

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

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



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1(35)

Чернігів 2024

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 4 від 25.03.2024 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. – № 1(35). – 380 с.

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

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

УДК 62:67.05

Головний редактор:

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

Заступник головного редактора:

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

Члени редакційної колегії:Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

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

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

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

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

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

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

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

Новомлинець 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.

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

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

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

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

Інформаційно-комп'ютерні технології

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

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

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

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

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

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

Мелешко С. 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»;

Приступа 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, НУ «Чернігівська політехніка»;

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

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

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

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

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

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

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

Будівництво та геодезія

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC JOURNAL

ISSUE № 1(35)

Chernihiv 2024

UDC 62:67.05

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-1(35)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 4 dated 25.03.2024). 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. – № 1(35). – 380 p.

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

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

UDC 62:67.05

Editor in chief:

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

Deputy Editor in chief:

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

Members of the Editorial Board:

Applied mechanics, materials science and machine building

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Information and computer technologies

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

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

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

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

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

Kryvoruchko 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, Chernihiv Polytechnic National University;

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

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

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

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

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

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

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

Construction and geodesy

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

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

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

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

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

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

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

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



ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Кальченко В., Венжега В., Пасов Г., Кологойда А., Кужельний Я., Богославський В.</i> Підвищення якості контролю пара-метрів деталей при виготовленні та ремонті автомобілів.....	9
<i>Пасов Г., Кологойда А., Корнієнко С., Мурашкова В.</i> Теоретичні засади професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків.....	18
<i>Прохоренко О., Лагодзінський І.</i> Числове моделювання напружено-деформованого стану при адитивному MIG наплавленні кремнієвою бронзою CuSi3Mn1	32
<i>Лавріненко В., Льницька Г., Солод В.</i> Сучасні напрацювання в нанесенні металічних покриттів на зерна шліфпорошків алмазів для шліфувального інструменту	48
<i>Макруха Т., Пузирьов О.</i> Огляд сучасних роботів зі штучним інтелектом.....	57
<i>Манохін А., Клименко С., Клименко С., Конєйкіна М., Мельничук Ю., Чумак А., Кременецький В., Новіченко В., Новиченко Н., Филипович А.</i> Структурний стан композитів, спечених із порошків cVN з покриттям зі сполук Ti.....	65
<i>Небеснюк О., Ніконова А., Алексієвський Д., Ніконова З.</i> Вплив технологічних чинників на якість приладових структур	75
<i>Самойленко О., Гао Сінмін.</i> Підготовка моделювання фрезерної обробки деталі, встановленої у фрактальних лещатах.....	81
<i>Яровий Ю., Фролов В., Сапон С., Ісаєнко І.</i> Дослідження шорсткості поверхні при обточуванні хромомолібденової сталі.....	90
<i>Степура О., Кондрашев П.</i> Моделювання та оптимізація процесу лазерного різання медичного ендопротеза (стенда)	99
<i>Дзюман Б., Осипчук О., Охріменко О.</i> Особливості свердління композитних матеріалів та їхній вплив на дефекти обробки.....	107

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Єременко В., Монченко О., Монченко Т., Кучеренко В.</i> Інформаційна технологія опрацювання медичних показників.....	121
<i>Бондар О., Ізвалов О.</i> Математичні моделі в комп'ютерних науках	128
<i>Волокита А., Меленчуков М.</i> Нейронні мережі у виявленні атак на розподілені системи.....	135
<i>Корнієнко С., Корнієнко І., Мурашкова В.</i> Алгоритм автоматизованої розробки програм випробувань зразків спеціальної техніки.....	146
<i>Сигута А., Красножон О.</i> Дослідження методів пошуку вибухонебезпечних предметів.....	156

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Денисенко Т., Коваль К., Напалько В.</i> Порівняльна оцінка якості соняшникової олії.....	170
<i>Зайцев С.</i> Удосконалення методу визначення деградації енергетичних олив під впливом акустичної кавітації.....	178
<i>Kosogina I., Fedenko Yu., Usova N.</i> Comparative characterization of sorption efficiency of activated carbon samples modified with Fe ₂ O ₃	190
<i>Мельник Л.</i> Формування композиту при варіюванні дисперсності наповнювача та виду зв'язуючого.....	198
<i>Челябієва В., Буяльська Н., Березкина Н.</i> Мікрофлора борошна як стартер процесів бродіння у харчових технологіях.....	204
<i>Філінська Т., Філінська А.</i> Рецептурні інновації як складові трансформації ринку майонезної продукції	212
<i>Філінська Т., Філінська А., Фурсова Л.</i> Дослідження властивостей продуктів перероблення цитрусових як добавок для майонезних соусів.....	225
<i>Kokosha A., Uschaporovskiy D., Vorobyova V., Motronyuk T., Vasiliev G.</i> Corrosion resistance of zinc galvanic deposits obtained by the electrochemical 3D printing method	232

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Денисов Ю., Скугарев В.</i> Вплив пульсації автономного інвертора напруги на похибку за фазою робочого органу бортової авіаційної системи слідкування.....	240
<i>Кирик В., Халіков В., Жерносєков А., Шатан О.</i> Комутаційний струм первинної обмотки трансформатора при варіаціях струму його холостого ходу	251
<i>Шинкаренко В.</i> Концепція генетичного ядра в структурній організації і еволюції складних електромеханічних систем.....	259
<i>Hlushko O., Lysenko N., Novyk K., Stala R., Waradzyn Z., Stepenko S.</i> Review of Top Energy Transition Innovators Impacting Renewable Energy Development	274
<i>Кудряшов В., Любимов А., Лещенко О., Добровольська С., Кисельова О.</i> Модель універсальної лабораторної установки дослідження параметрів електронних приладів та систем.....	285

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

<i>Зацерковний В., Ворох В.</i> Диференційні технології прецизійного землеробства.....	292
<i>Кравчук А., Кравчук О., Возний О.</i> Особливості роботи напірних похильних збірних дренажних трубопроводів за наявності похилу рівня ґрунтових вод.....	302
<i>Мамонов К., Гой В., Штерндок А.</i> Геопросторовий моніторинг використання земель об'єднаних територіальних громад	311
<i>Петраковська О., Михальова М.</i> Структуризація територіальних зон з погляду встановлення обмежень у використанні земель	319
<i>Сахно Є., Щербак Ю., Коваленко С., Хрістодулопулос А.</i> Інтеграція систем визначення координат об'єктів та дешифрування знімків дистанційного зондування землі	329
<i>Brydun A., Sohor A., Fys M., Hubar Yu.</i> Web mapping of surface water pollution in Lviv region by means of GIS and remote sensing	337
<i>Согор А., Марченко Д., Крива Х.</i> Способи обчислення параметрів референц-еліпсоїда за даними регіонального гравітаційного поля землі	346
<i>Тадєєв О.</i> До проблеми оцінювання кутових спотворень сучасних земних референціальних систем	357
<i>Гусєв В., Нікіфорова Т.</i> Аналіз файлів у форматі STL, як основа моделювання для 3D-друку будівельних об'єктів	368
ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ	379

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE
AND MACHINE BUILDING

<i>Kalchenko V., Venzhega V., Pasov H., Kolohoida A., Kuzhelnyi Ya., Bogoslavskij V.</i> Improving the quality of the control of parts parameters in the manufacture and repair of vehicles.....	9
<i>Pasov G., Kolohoida A., Korniienko S., Murashkovska V.</i> Theoretical foundations of professionally-oriented education of mathematical disciplines for future mechanical engineers.....	18
<i>Prokhorenko D., Lahodzinskiy I.</i> Numerical modeling of the stress-strain state during additive MIG welding with CuSi3Mn silicon bronze	32
<i>Lavrinenko V., Ilnytska G., Solod V.</i> Modern developments in the application of metallic coatings on the grains of diamond grinding powder for grinding tools	48
<i>Makrukha T., Puzyrov O.</i> Review of modern robots with artificial intelligence.....	57
<i>Manokhin A., Klymenko S., Klymenko S., Kopieikina M., Melniychuk Yu., Chumak A., Kremenetskiy V., Novichenko V., Novychenko N., Fylypovych A.</i> Structural state of composites sintered from cBN poeders with a coating of compounds Ti	65
<i>Nebesniuk O., Nikonova A., Alekseevskiy D., Nikonova Z.</i> The influence of technological factors on quality of instrument structures	75
<i>Samoilenko O., Xingmin Gao.</i> Simulation preparation of the milling processing of the part installed in the fractal vice.....	81
<i>Yarovy Yu., Frolov V., Sapon S., Isaienko I.</i> Study of surface roughness in turning of chromium-molybdenum steel	90
<i>Stepura O., Kondrashev P.</i> Modeling and optimization of the laser cutting process of a medical endoprosthesis (stent)	99
<i>Dzyuman B., Osypchuk O., Okhrimenko O.</i> Features of drilling composite materials and their influence on processing defects.....	107

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Yeremenko V., Monchenko O., Monchenko T., Kucherenko V.</i> Information technology for processing medical indicators.....	121
<i>Bondar O., Izvalov O.</i> Mathematical models in computer sciences	128
<i>Volokyta A., Melenchukov M.</i> Neural networks in detecting attacks on distributed systems.....	135
<i>Korniienko S., Korniienko I., Murashkovska V.</i> Algorithm for automated development of programs for testing samples of special equipment	146
<i>Syguta A., Krasnozhon O.</i> Research of methods of searching for explosive objects	156

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Denysenko T., Koval K., Napalko V.</i> Comparative assessment of the quality of sunflower oil.....	170
<i>Zaitsev S.</i> Improvement of the method for determining the degradation of energy oils under the influence of acoustic cavitation	178
<i>Kosogina I., Fedenko Yu., Usova N.</i> Comparative characterization of sorption efficiency of activated carbon samples modified with Fe ₂ O ₃	190
<i>Melnyk L.</i> Formation of composite with variation of dispersity of filler and type of binder.....	198
<i>Cheliabiieva V., Buialska N., Berezkina N.</i> Microflora of flour as a starter of fermentation processes in food technologies	204
<i>Filinska T., Filinska A.</i> Recipe innovations as ingredient transformations of the mayonnaise market.....	212
<i>Filinska T., Filinska A., Fursova L.</i> Study of the properties of citrus processing products as additives for mayonnaise sauces	225
<i>Kokosha A., Uschapovskiy D., Vorobyova V., Motronyuk T., Vasiliev G.</i> Corrosion resistance of zinc galvanic deposits obtained by the electrochemical 3D printing method	232

SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

<i>Denisov Yu., Skuhariiev V.</i> The influence of pulsations of an autonomous voltage inverter on the phase of the operating organ of the on-board aviation following system.....	240
<i>Kyryk V., Khalikov V., Zhernosekov A., Shatan O.</i> Switching current of the primary winding of the transformer with variations in its no-load current	251
<i>Shynkarenko V.</i> Conception of genetic core in structural organisation and evolution of complex electromechanical systems	259
<i>Hlushko O., Lysenko N., Novyk K., Stala R., Waradzyn Z., Stepenko S.</i> Review of Top Energy Transition Innovators Impacting Renewable Energy Development	274
<i>Kudryashov V., Lyubimov A., Leshchenko O., Dobrovolska S., Kyselyova O.</i> A model of a universal laboratory installation research of parameters of electronic devices and systems.....	285

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

<i>Zatserkovny V., Vorokh V.</i> Differential technologies of precision agriculture	292
<i>Kravchuk A., Kravchuk O., Voznyi O.</i> Operational features of inclined collecting drainage pipelines in the presence of groundwater level slope	302
<i>Mamonov K., Goi V., Shterndok A.</i> Geospatial monitoring of land use of united territorial communities	311
<i>Petrakovska O., Mykhalova M.</i> Structuring of territorial zones from the point of view of establishing limitations on land use.....	319
<i>Sakhno Ye., Shcherbak Yu., Kovalenko S., Christodoulopoulos A.</i> Integration of systems for determining the coordinates of objects and definition of remote earth sensing pictures	329
<i>Brydun A., Sohor A., Fys M., Hubar Yu.</i> Web mapping of surface water pollution in Lviv region by means of GIS and remote sensing	337
<i>Sohor A., Marchenko D., Kryva K.</i> Methods of calculating the parameters of the reference ellipsoid according to the data of the regional gravity field of the earth.....	346
<i>Tadyeyev O.</i> To the problem of evaluation the angular distortions of modern earths reference systems	357
<i>Husiev V., Nikiforova T.</i> Analysis of files in stl format as the basis of modeling for 3d printing of building objects	368
BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES.....	379

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-1(35)-9-17

УДК 621.7.08

**Володимир Кальченко¹, Володимир Венжега², Геннадій Пасов³,
Антоніна Кологойда⁴, Ярослав Кужельний⁵, Владислав Богославський⁶**

¹доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vykalchenko74@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9072-2976>
ResearcherID: G-6752-2014. **Scopus Author ID:** 56644727300

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vivenzhega@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>
ResearcherID: H-3560-2014. **Scopus Author ID:** 16510833000.

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>
ResearcherID: H-4455-2014. **Scopus Author ID:** 57220212743

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).
E-mail: kolohoida@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>
ResearcherID: I-1118-2014. **Scopus Author ID:** 57222329484

⁵кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: k.y.v.immortal@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5269-8557>
ResearcherID: J-1127-2016

⁶здобувач вищої освіти, гр. МАТ-231
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vlab.bog26.06@gmail.com.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ТА РЕМОНТІ АВТОМОБІЛІВ

У роботі досліджено вимоги по точності до основних класів деталей автомобілів та методи контролю їх лінійних і кутових розмірів, відхилень форми і розташування поверхонь, прихованих дефектів при виробництві та ремонті автомобілів. Одним із перспективних напрямів підвищення якості виготовлення автомобільної продукції та проведення ремонтів, підвищення конкурентоспроможності продукції є покращення роботи відділів технічного контролю, які саме і здійснюють контроль на всіх етапах виробництва та за готовою продукцією на підприємстві. На основі проведеного аналізу пропонується поряд із використанням механічних, оптичних, пневматичних та електричних засобів вимірювання як найширше використовувати засоби нового типу – координатно-вимірювальні машини, що призначені для контролю складних корпусних деталей, точного вимірювання довжин, похибок форми й інших параметрів, сучасні кругломіри та прилади для вимірювання шорсткості з автоматичною обробкою інформації та управлінням від персонального комп'ютера.

Стаття є публікацією науково-методичного характеру.

Ключові слова: вимірювання; контроль; розміри; шорсткість; засоби вимірювання; координатно-вимірювальні машини.

Рис.: 2. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. Нині якість вітчизняної автомобільної техніки і проведення ремонтів дещо нижча від закордонної. Таке становище викликано багатьма факторами, одним із яких є гірший рівень забезпечення відділів технічного контролю сучасною вимірювальною технікою та використання сучасних вимірювальних технологій, статистичних методів управління якістю. Це стосується як виробничого процесу машинобудівного виробництва, що охоплює всі дії, пов'язані з виготовленням продукту виробництва, так і ремонтного виробництва. Причому виробничий процес ремонту складніший за відповідний процес виготовлення в машинобудуванні. Капітальний ремонт містить у собі всі елементи машинобудівного виробництва, а також додатково специфічні технології діагностування, розбирання очищення та відновлення.

Технічний контроль є невід'ємною частиною виробничого процесу. Основним завданням технічного контролю на підприємстві є своєчасне отримання повної та достовірної інформації про якість продукції, стан устаткування і технологічного процесу з метою попередження несправностей та відхилень, які можуть призвести до порушень вимог стандартів і технічних умов. У машинобудуванні він являє собою сукупність контрольних операцій, які виконуються на всіх стадіях виробництва різними службами підприємства залежно від об'єкта контролю. Тому підвищення точності проведення контрольних операцій на всіх етапах виробництва та контролю готової продукції є необхідною умовою підвищення рівня якості та конкурентоспроможності продукції.

Постановка проблеми. Сучасна автомобільна техніка – складні технічні системи, що працюють з високими швидкостям, під великим силовими навантаженнями, тому потребують високих вимог до точності розмірів, відхилень форми і розташування, шорсткості поверхонь деталей. Ці вимоги можуть бути досягнуті лише в тому випадку, коли контроль за виробничим процесом машинобудівного виробництва буде охоплювати всі дії, що пов'язані з виготовленням продукту виробництва, а саме:

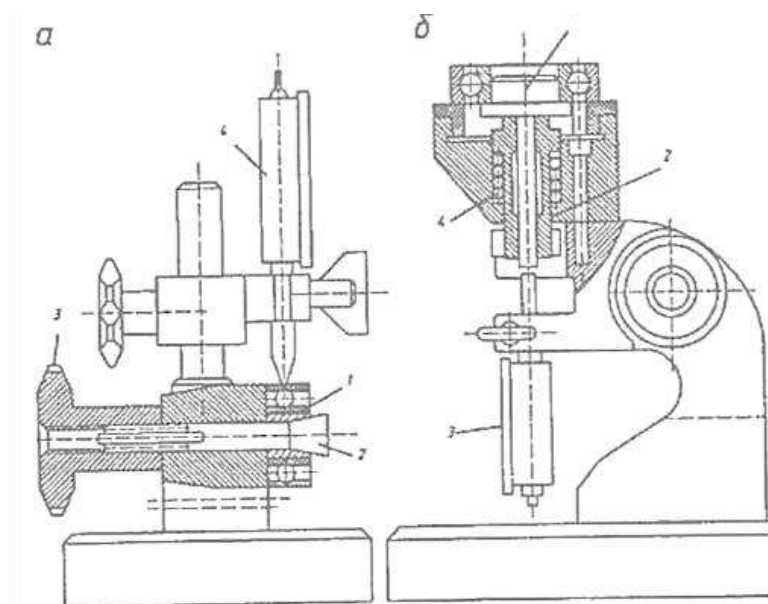
- підготовку засобів виробництва та їх обслуговування;
- одержання, транспортування і зберігання матеріалів, напівфабрикатів, вихідних заготовок, комплектуючих деталей і складальних одиниць;
- механічну і термічну обробку, миття, фарбування, балансування, старіння;
- технічний контроль, випробування і атестацію продукції на всіх етапах виробництва.

Технічний контроль забезпечує необхідну налаштованість процесу виробництва й підтримує його стабільність, тобто стійку повторюваність кожної операції в передбачених технологічних режимах, нормах і умовах. Об'єктами технічного контролю на машинобудівному підприємстві є матеріали, напівфабрикати на різних стадіях виготовлення, готова продукція (деталі, дрібні складальні одиниці, вузли, блоки, вироби), засоби (устаткування, інструмент, прилади, пристрої), технологічні процеси й режими обробки, загальна культура виробництва.

У роботі потрібно провести дослідження відомих способів контролю типових деталей автомобілів та готових виробів з метою виявлення недоліків та запропонувати сучасні способи вирішення проблем для покращення якості продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На заводах з великою виробничою програмою контроль і сортування деталей проводяться переважно граничним інструментом, що сприяє підвищенню продуктивності праці [1]. Контроль діаметральних розмірів шийок різних валів, поршневих пальців, штовхачів, клапанів, зовнішнього і внутрішнього діаметрів шліцьових валів, шліців по ширині здійснюється скобами. Перевірка зовнішнього і внутрішнього діаметрів шліцьових валів може проводитися спеціальним кільцем. Контроль профільних поверхонь валів, наприклад кулачків розподільних валів, проводиться скобами й шаблонами. Для контролю лінійних розмірів, наприклад довжини шатунних і корінних шийок, шпонкових канавок і шліцьових западин по ширині, застосовуються листові пробки і шаблони. З граничного інструменту для контролю отворів використовуються гладкі калібри (пробки) і листові пробки. З універсального вимірювального інструмента використовуються мікрометри, індикатори для зовнішніх і внутрішніх вимірів.

Контроль зношення зубів шестерень по товщині виміром за початковим колом проводиться штангензубоміром, оптичним зубоміром або спеціальними шаблонами [2]. Контрольні пристрої застосовуються для перевірки пружності пружин, підшипників кочення, прогинання валів, тощо. На рис. 1 наведені пристрої для контролю підшипників кочення [2].



*Рис. 1. Пристрої для контролю:
а – радіального зазору в кульковому підшипнику;
б – осевого зазору в кульковому підшипнику*

Для визначення величини радіального люфту підшипник 1, що перевіряється, надівається на розрізну втулку 2 і разом з нею затягується конусом за допомогою фасонної гайки 3. До зовнішнього кільця підшипника підводиться наконечник індикатора 4. Надаючи зовнішньому кільцю коливальні рухи у вертикальному напрямку, за відхиленням стрілки індикатора можна визначити радіальний зазор підшипника. Осьовий зазор перевіряється на іншому пристрої (рис. 1, б). Підшипник, що перевіряється, зовнішнім кільцем встановлюється на опорну площину приладу. Внутрішнє кільце підшипника надівається на повзун 1, який рухається напрямною 2. Нижній торець повзуна впирається в наконечник індикатора 3. При натисненні рукою на внутрішнє кільце, останнє отримує зворотньо-поступальний рух вгору і вниз. При цьому показники стрілки індикатора вкажуть на числове значення осевого зазору. Пересування кільця вгору здійснюється пружиною 4.

Пристрій активного контролю розміру отвору при хонінгуванні (рис. 2) у своєму складі має жорсткий калібр 1 [3]. Цей калібр рухається разом з хонінгувальною голівкою і при досягненні заданого значення діаметра оброблюваного отвору входить у нього й викликає спрацювання електроконтактного перетворювача 2, який видає сигнал на припинення обробки.

На контрольній операції перспективно застосовувати пневматичні довгоміри для вимірювання внутрішнього діаметра й конусності отворів гільз циліндрів і сортування їх на розмірні групи [4].

Для корпусних деталей автомобіля, головок циліндрів поряд з контролем розмірів та геометричної форми деталей дуже важливо встановити і наявність у них прихованих дефектів у вигляді різного роду поверхневих та внутрішніх тріщин [5]. Останнє особливо необхідне стосовно відповідальних деталей, пов'язаних з безпекою руху автомобіля.

Контроль прихованих дефектів може проводитися різними методами: гідравлічним тиском (опресовування), магнітною, люмінесцентною (флуоресцентною) і ультразвуковою дефектоскопіями. Контроль рентгеновським промінням не набув поширення в автотремонтному виробництві. Усі вказані методи дозволяють знаходити приховані дефекти в деталях без пошкодження останніх [2; 6].

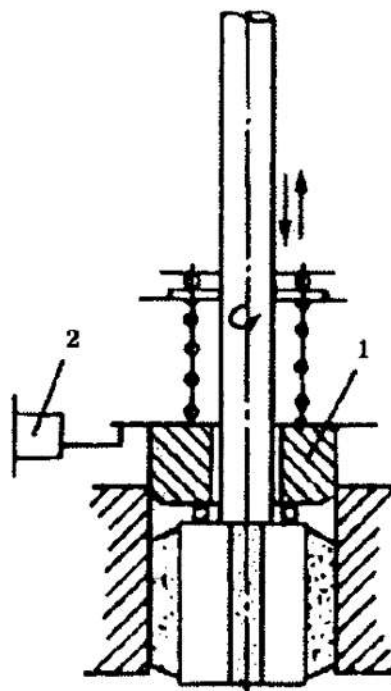


Рис. 2. Схема виміральної установки хонінгувального верстата

Метод дефектоскопії, що базується на гідравлічному тиску (опресовування), застосовується для виявлення тріщин у корпусних деталях переважно в блоках і головках циліндрів. Для цієї мети використовуються стенди різної конструкції. Зовнішні отвори деталі, що підлягає випробуванню, закриваються кришками і заглушками. Сорочку блоку або внутрішню порожнину головки заповнюють водою під тиском 300-400 кПа. За постійністю тиску й наявності течі судять про герметичність стінок сорочки блока циліндрів або стінок головки.

Магнітний метод. Умовам авторемонтного виробництва найбільш відповідає магнітний метод, що відрізняється досить високою точністю, короткочасністю і простотою апаратури. Суть методу магнітної дефектоскопії полягає в наступному. Якщо через контрольовану деталь пропустити магнітний потік, то за наявності в останній тріщин магнітна проникність буде неоднаковою, унаслідок чого відбудеться зміна значення і напрямку магнітного потоку. На реєстрації останнього і ґрунтуються методи магнітної дефектоскопії.

Для контролю колінчастих валів застосовується магніто-електричний дефектоскоп МЕД-2. Дефектоскоп розрахований на контроль деталей діаметром до 90 мм і завдовжки до 900 мм. Контроль колінчастого вала здійснюється циркулярним намагніченням одночасно всіх шатунних шийок. Тривалість контролю одного вала складає в середньому 1,5...2 хв. Живлення дефектоскопа проводиться від мережі напругою 127/220 В. Дефектоскоп забезпечений камерою для розмагнічування. Крім МЕД-2, можуть застосовуватися й інші дефектоскопи, наприклад М-217, 77 ПМД-31, а для деталей автомобілів великої вантажопідйомності – УМД-900. З пересувних дефектоскопів можна використовувати дефектоскопи 77МД-ВМ і напівпровідниковий ППД.

Люмінесцентний (флуоресцентний) метод. Методом магнітної дефектоскопії можна контролювати лише деталі з феромагнітних матеріалів (сталь, чавун). Для контролю деталей з кольорових металів необхідні інші методи, які могли б знайти успішне застосування в авторемонтному виробництві. До цих методів відноситься люмінесцентний (флуоресцентний) метод. Суть методу люмінесцентної дефектоскопії полягає в наступному. Очищені і знежирені деталі, що підлягають контролю, занурюють у ванну з флуоресцентною рід-

ною або наносять цю рідину на деталі. До вказаної суміші додається фарбник. При освітленні ультрафіолетовим промінням отриманий розчин дає яскраве свічення. Нанесена на поверхню деталі флуоресцентна рідина, проникає в наявні тріщини і там затримується. Люмінесцентний (флуоресцентний) метод дозволяє знайти глибокі тріщини, що світяться у вигляді широких смуг, а також і мікроскопічні, які світяться тонкими лініями.

Ультразвуковий метод. Ультразвукова дефектоскопія ґрунтується на виявленні поширення в металі ультразвукових коливань і віддзеркалення їх від дефектів, що порушують суцільність металу (тріщини, раковини та ін.). Для ультразвукової дефектоскопії необхідні високі частоти за невеликої потужності випромінювання, тому застосовується п'єзоелектричний ефект. Контроль деталей ультразвуковим методом можна здійснювати двома способами: тіншовим та імпульсним відлунюванням. При тіншовому методі виявлення дефектів проводиться введенням ультразвуку в деталь, поміщену між випромінювачем і приймачем. Ультразвуковий дефектоскоп може використовуватися в ремонтному виробництві для контролю якості відновлення деталей металопокриттям, якості заливки підшипників, тощо. Найбільшого поширення набули імпульсні дефектоскопи, що працюють за принципом віддзеркалення ультразвукових хвиль. Для авторемонтного виробництва рекомендований дефектоскоп УЗД-7Н, яким можна контролювати деталі як імпульсним, так і тіншовим методами. Ультразвуковий контроль володіє високою чутливістю до виявлення прихованих дефектів. Промисловістю випускаються й інші дефектоскопи, наприклад УЗД-НІІМ-5, УЗД-10М, які можуть застосовуватися в авторемонтному виробництві.

Великий інтерес становить електромагнітний індуктивний дефектоскоп типу ЕМІД-4М, що дозволяє здійснювати контроль комплексу властивостей заготовок і готових деталей з феромагнітних і неферомагнітних металів і сплавів. Вказаним дефектоскопом можна оцінити якість термічної і хіміко-термічної обробки за твердістю, структурою і міцністю, виявити наявність тріщин, внутрішніх напруг, сортувати деталі за марками сталі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить що, для контролю точнісних характеристик основних класів деталей автомобіля, які найбільше впливають на його працездатність та довговічність застосовуються методи та засоби контролю, які не завжди в повній мірі можуть забезпечити точність вимірювання основних параметрів. Тому виникла нагальна необхідність у впровадженні сучасних методів та засобів вимірювання поверхонь найбільш відповідальних деталей автомобіля.

Метою статті є дослідження вимог до точності розмірів, відхилень форми і розташування поверхонь, шорсткості до основних класів деталей автомобіля та існуючих способів їх вимірювання і контролю з метою виявлення недоліків та впровадження сучасних методів і засобів контролю для вирішення проблеми покращення якості продукції.

Виклад основного матеріалу. Недосконалість багатьох сучасних машин у значній мірі залежить від недостатньої працездатності деталей і вузлів унаслідок неточності їх виготовлення, передчасного зношування та відмов. У сучасних конструкціях машин істотно ускладнилися умови роботи деталей унаслідок інтенсивного використання, ударних навантажень, дії агресивних середовищ, різких перепадів температури, високих швидкостей і тиску. У цьому зв'язку недостатньо знати тільки статичні характеристики матеріалів властивості робочих поверхонь, але й ті властивості матеріалів, робочих поверхонь деталей, які характеризують їхній опір динамічним впливам і процесам, викликані цими впливами в різних умовах експлуатації та вміти їх контролювати.

Різноманітні за функціями і виконанням автомобільні агрегати стають однорідними на рівні їх деталей. Аналіз деталей за формою, матеріалами, розмірами та службовим призначенням показує, що вони можуть бути віднесені до обмеженої кількості класів. Кожному класу деталей, як правило, відповідає своя технологія виготовлення та ремонту, що використовує уніфіковані технологічні процеси, що включають і контрольні операції.

В авторемонтному виробництві застосовують класифікації деталей К. Т. Кошкіна і Г. А. Малишева [4]. Найбільший вплив на надійність автомобільних агрегатів має якість виготовлення та ремонту таких класів деталей:

- ◆ нерухомих: корпусів, картерів, гільз;
- ◆ що обертаються: валів, дисків, зубчастих коліс, кулачків, ексцентриків;
- ◆ що рухаються поступально: поршнів, штоків, повзунів, клапанів;
- ◆ що беруть участь у перетворенні рухів: важелів, шатунів, штанг.

В процесах виготовлення та ремонту близько 90 % трудомісткості й собівартості робіт припадає саме на ці класи деталей. Розглянуті нижче деталі (корпусні, вали, гільзи й стрижні з отворами) складають 60–80 % маси агрегату [4]. Їх технічний стан найбільшою мірою визначає надійність автомобільних агрегатів. Розглянемо вимоги до точності основних деталей цих класів, оскільки вони безпосередньо впливають на вибір методів та засобів вимірювання.

До корпусних деталей відносять блоки й головки циліндрів, картери зчеплень, кришки розподільчих шестерень, корпуси карбюраторів, оливних, водяних і паливних насосів та ін. Матеріал корпусних деталей, сірий чавун (СЧ 18), алюмінієвий (АЛ 4) або цинковий (ЗАМАК) сплави. Найбільш поширений перший вид матеріалу. Корпусні деталі орієнтують рухомі деталі агрегату при його роботі. Одна з найбільш складних у технологічному відношенні корпусних деталей – це блок циліндрів двигуна, який на операціях виготовлення збирається з кришками корінних підшипників і картером зчеплення. Основними вимогами до поверхонь є мала шорсткість і висока точність розмірів, форми й розташування основних циліндричних і плоских поверхонь.

Найпоширенішими деталями типу пустотілих циліндрів є вставні гільзи циліндрів із сірого чавуну СЧ 24 чи зносостійкого чавуну ИЧГ-33М твердістю 197-241 НВ. Найбільш відповідальною поверхнею з найвищими вимогами по точності є дзеркало циліндра.

Основними представниками деталей типу круглих стрижнів є вали та осі. Вали служать в агрегатах для передачі крутного моменту й перетворення рухів (поступального в обертальний або навпаки). Найбільш складні деталі з них – це колінчасті та розподільчі вали. Деталі мають такі конструктивні елементи: шийки, кривошипи, кулачки, шпонкові пази, торці, стики й отвори.

Осі на відміну від валів не передають крутні моменти і навантажені тільки поперечними силами і згинаючими моментами. Осі мають лише частину перерахованих конструктивних елементів, що належать валам.

Колінчасті вали виготовляють із конструкційних (сталь 45), легованих (18ХНВА, 18ХНЗА, 20ХГНМ, тощо) сталей або високоміцного чавуну (ВЧ 50, ВЧ 70). Розподільчі вали виготовляють з покращених сталей 45, 40Г, 50Г або цементуємих сталей 20, 20Г. По конструкції колінчасті вали є відносно не жорсткою деталлю, в той же час сприймають великі змінні навантаження і піддаються впливу сил кручення і згину. Колінчасті вали повинні задовольняти наступним вимогам, що характеризують геометричну точність і якість поверхневого шару деталей [6].

1. Твердість шийок, що піддаються загартуванню, повинна бути не менша 52 HRC. При цьому галтельні переходи не повинні піддаватися загартуванню.

2. Шорсткість циліндричних поверхонь шийок діаметром до 100 мм повинна бути менша $R_a 0,32$, діаметром більше 100 мм – менша за $R_a 0,63$ мкм.

3. Діаметри корінних і шатунних шийок повинні виконуватися по 6-7 квалітету точності. Відхилення від округлості при цьому повинні відповідати 5-6 ступеню.

4. Биття корінних шийок щодо осі вала не повинно перевищувати 0,03 мм для шийок діаметром до 100 мм і 0,04 мм для шийок діаметром більше ніж 100 мм.

5. Відхилення радіуса кривошипа допускається не більше $\pm 0,15$ мм на 100 мм довжини радіуса. При цьому зміщення кутів між колінами кривошипів допускається не більше $\pm 30'$ по всій довжині вала.

6. Биття торця з'єднувального фланця кріплення маховика має бути не більше ніж 0,01 мм на 100 мм діаметру фланця.

7. Колінчастий вал повинен бути динамічно збалансований. Величина дисбалансу повинна знаходитися в межах 20...70 г·см. Більші значення дисбалансу допускаються при частотах обертання вала менш 1500 хв^{-1} .

Розподільчий вал є основним елементом приводу клапанів механізму газорозподілу двигуна. До нього висуваються жорсткі вимоги по точності та шорсткості робочих поверхонь: шорсткість робочих поверхонь кулачків повинна бути в межах 0,32...0,63 мкм за параметром R_a ; опорні шийки обробляють за 6-м квалітетом точності із шорсткістю поверхні R_a 0,32...0,63 мкм; овальність і конусність шийок не повинна перевищувати 0,01 мм; радіальне биття опорних шийок – 0,015...0,02 мм; неперпендикулярність опорного торця шийки до твірної не більше 0,02...0,03 мм., шорсткість його поверхні R_a 1,25...0,8 мкм.

До деталей класу «некруглі стрижні» відносять шатуни, важелі і коромисла. Шатуни беруть участь у перетворенні поступального руху в обертальний, а важелі і коромисла – в передачі поступального руху. Допуск на розмір отворів головок шатуна відповідає 5-му або 6-му квалітету, на розмір між осями цих отворів – 9-му або 10-му квалітету й на паралельність їхніх осей – 8-му або 9-му ступеню точності. Шорсткість відновлених поверхонь отворів і бойків $R_a = 0,16$ мкм.

На сучасних автопідприємствах використовуються координатно-вимірювальні машини (КВМ) - програмно-технічний комплекс, для контролю геометричних параметрів готових виробів, заготовок, інструменту, оснащення тощо. Випускаються промисловою портального, мостового та стоечного типу. Управління координатно-вимірювальною машиною здійснюється в ручному режимі або за керуючою програмою з персонального комп'ютера. Робочим елементом координатно-вимірювальної машини є піноль, на якій встановлена вимірювальна головка з датчиком. Датчики можуть бути контактні, лазерні та оптичні. За допомогою координатно-вимірювальної машини проводиться контроль параметрів геометричних елементів (точки, прямої, площини, окружності, сфери, циліндра, конуса), їх взаємного розташування і відхилення від правильності форми. Координатно-вимірювальна машина дозволяє проводити аналіз складних криволінійних поверхонь, а програмне забезпечення з комплекту поставки координатно-вимірювальної машини, дає можливість проводити порівняння результатів вимірювання з математичною моделлю. Найбільш поширені координатно-вимірювальні машини таких брендів як DEA (Італія), Leitz (Німеччина), ROMER (Франція) и TESA (Швейцарія). Наприклад, високоточна вимірювальна станція HOMMEL-ETAMIC FMS 8200 призначена для контролю всіх параметрів відхилень форми і позиційних допусків. Спеціальна конструкція зі шпинделем, на який встановлено вимірювальний датчик, і п'ятьма вимірювальними осями є дуже гнучке рішення для автоматизованого вимірювання всіх відхилень форми і позиційних допусків на великих і важких деталях. Особливостями системи є:

- п'ять вимірювальних осей, дві осі для вирівнювання, а також додаткові осі для вимірювання V-подібних моторних блоків;
- автоматичне налаштування вимірювальної системи по діаметру заготовки;
- дискретність вимірювання 1 мкм;
- повністю автоматизований вимірювальний цикл з широкими можливостями для аналізу програмним забезпеченням TURBO FORM;
- ідеально підходить для блоків циліндрів, коробок передач, колінчастих валів, поршнів великого діаметра тощо;
- мобільний блок управління для легкого управління всією системою.

Для контролю відхилень форми і взаємного розташування поверхонь дуже перспективними у використанні є сучасні кругломіри з повністю автоматизованим процесом вимірювання, призначені для вимірювання круглості, площинності, циліндричності, конусності, биття, паралельності та іншого. Італійський виробник SM-Metrology (Італія) постачає кругломіри з наступними основними характеристиками:

- повністю автоматизований процес вимірювання;
- дискретність 1 мкм;
- автоматичне перемикання напрямку вимірювання для різних завдань за один прийом;
- легка зміна оброблюваної деталі завдяки широким діапазонам вимірювання і переміщення;
- помилка відхилення від округлості $0,1 \text{ мкм} + 0,0008 \text{ мкм/мм}$ вимірюваної висоти;
- помилка відхилення від радіального биття $0,1 \text{ мкм} + 0,0008 \text{ мкм/мм}$ радіуса;
- помилка прямолінійності $0,3 \text{ мкм/100 мм}$.

Для контролю шорсткості найвищого класу точності з персональним комп'ютером можна використовувати лабораторні прилади типу HOMMEL TESTER T8000. Вони призначені для визначення всіх звичайних параметрів шорсткості за діючими в даний час нормами та розрахунку спеціальних параметрів. Мають велику кількість вимірювальних програм і протоколів. Є можливість використання будь-яких принтерів, підтримуваних Windows, можливість сполучення з усіма програмами Windows, наприклад Winword, Excel, Write, Access тощо, та контролю мікро- і макропрофілей, а також визначення топографії поверхні. Їх діапазони вимірювання складають:

- +/- 8 мкм (роздільна здатність 1 нм);
- +/- 80 мкм (роздільна здатність 10 нм);
- +/- 800 мкм (роздільна здатність 100 нм);
- +/- 8000 мкм (роздільна здатність 1000 нм).

Висновки. У роботі досліджено точнісні характеристики поверхонь найбільш відповідальних деталей автомобілів, методи та засоби контролю їхніх розмірів, відхилень форми та розташування, шорсткості, прихованих дефектів та обґрунтовано й запропоновано до впровадження в процес вимірювання програмно-технічні комплекси – координатно-вимірювальні машини, сучасні комп'ютеризовані кругломіри та прилади для вимірювання параметрів шорсткості. Це забезпечить необхідну налаштованість процесу виробництва й буде підтримувати його стабільність, та стійку повторюваність кожної операції в передбачених технологічних режимах, нормах і умовах, а отже, сприятиме підвищенню рівня якості й конкурентоспроможності автомобілів.

Список використаних джерел

1. Чередніков, О. М. Технологічні основи ремонту машин і відновлення деталей : навч. посіб. / О. М. Чередніков. – Чернігів : ЧДТУ, 2008. – 212 с.
2. Божидарнік, В. В. Основи технології виробництва і ремонту автомобілів : навч. посіб. / В. В. Божидарнік, А. П. Гусев. – Луцьк : Надстир'я, 2007. – 320 с.
3. Кальченко, В. І. Відновлення деталей автомобілів : навч. посіб. / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, В. І. Венжега. – Чернігів : ЧНТУ, 2013. – 192 с.
4. Основи технології виробництва і ремонту автомобілів : навч. посіб. / І. Б. Гевко, Р. М. Рогатинський, О. Л. Ляшук, В. З. Гудь, М. Г. Левкович, М. Я. Сташків, М. Д. Сіправська. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2021. – 544 с.
5. Ремонт автомобілів : навч. посіб. / упор. В. Я. Чабанний. – Кіровоград : Кіровоградська районна друкарня, 2007. – 720 с.
6. Коваленко, В. М. Діагностика і технологія ремонту автомобілів : підручник / В. М. Коваленко, В. К. Щуріхін. – Київ : Література ЛТД, 2017. – 224 с.

References

1. Cherednikov, O.M. (2008). *Tekhnolohichni osnovy remontu mashyn i vidnovlennia detalei [Technological basics of machine repair and restoration of parts]*. ChDTU.
2. Bozhidarnik, V.V., Gusev, A.P. (2007). *Osnovy tekhnolohii vyrobnytstva i remontu avtomobiliv [Basics of automobile production and repair technology]*. Nadstyrya.

3. Kalchenko, V.I., Kalchenko, V.V., Wenzhega, V.I. (2013). *Vidnovlennia detalei avtomobiliv [Restoration of car parts]*. ChNTU.

4. Gevko, I.B., Rohatynskiy, R.M., Lyashuk, O.L., Gud, V.Z., Levkovich, M.G., Stashkiv, M.Ya., Sipravska, M.D. (2021). *Osnovy tekhnologii vyrobnytstva i remontu avtomobiliv [Fundamentals of automobile production and repair technology]*. Ivan Pulyuy TNTU.

5. Pastoral, V.Ya. (Eds.). (2007). *Remont avtomobiliv [Car repair]*. Kirovohrad district printing house.

6. Kovaleknko, V.M., Shchurikhin, V.K. (2017). *Diahnostyka i tekhnolohiia remontu avtomobiliv [Diagnostics and technology of car repair]*. Literature LTD.

Отримано 19.02.2024

UDC 621.7.08

**Volodymyr Kalchenko¹, Volodymyr Venzhega², Hennadiy Pasov³, Antonina Kolohoida⁴,
Yaroslav Kuzhelnyi⁵, Vladislav Bogoslavskij⁶**

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in scientific and pedagogical work
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vykalchenko74@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9072-2976>

ResearcherID: G-6752-2014. **Scopus Author ID:** 56644727300

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vivenzhega@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>

ResearcherID: H-3560-2014. **Scopus Author ID:** 16510833000

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Industrial Mechanical Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>

ResearcherID: I-1118-2014. **Scopus Author ID:** 57222329484

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kolohoida@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>

ResearcherID: H-4455-2014. **Scopus Author ID:** 57220212743

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: k.y.v.immortal@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5269-8557>

ResearcherID: J-1127-2016

⁶student of Higher Education, gr. MAT-231

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vlab.bog26.06@gmail.com

IMPROVING THE QUALITY OF THE CONTROL OF PARTS PARAMETERS IN THE MANUFACTURE AND REPAIR OF VEHICLES

Technical control is an integral part of the production process. The main task of technical control at the enterprise is the timely receipt of complete and reliable information about the quality of products, the state of the equipment and the technological process in order to prevent malfunctions and deviations that may lead to violations of the requirements of standards and technical conditions. In mechanical engineering, it is a set of control operations that are performed at all stages of production by various departments of the enterprise depending on the object of control.

Technical control ensures the necessary configuration of the production process and maintains its stability, i.e. stable repeatability of each operation in the prescribed technological regimes, norms and conditions. The objects of technical control at the machine-building enterprise are materials, semi-finished products at various stages of production, finished products (parts, small assembly units, assemblies, blocks, products), means (equipment, tools, devices, devices), technological processes and processing modes, general culture of production.

Therefore, improving the quality of control operations at all stages of production and quality control of finished products is a necessary condition for improving the quality and level of competitiveness of products.

The work analyzes the accuracy characteristics of the main classes of car parts, which most affect its performance and durability, and which are subject to strict requirements for the accuracy of dimensions, shape deviations and mutual location, roughness, absence of defects on working surfaces, and currently existing methods and means of control cannot fully ensure the measurement of these parameters, and therefore there is an urgent need to introduce fundamentally new modern computerized means of their control, such as coordinate measuring machines, circular gauges, devices for controlling roughness.

The article is a scientific and methodological publication.

Key words: measurement; control; dimensions; roughness; measuring tools; coordinate measuring machines.

Fig.: 2. References: 6.

Геннадій Пасов¹, Антоніна Кологойда², Світлана Корнієнко³, Віра Мурашківська⁴

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. **ResearcherID:** H-4455-2014

²кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: kolohoida@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>. **ResearcherID:** I-1118-2014

³кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: cornel@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9162-1229>. **ResearcherID:** AAV-4708-2020

⁴старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vmurashkovska@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0556-8709>. **ResearcherID:** G-9757-2016

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОФЕСІЙНО ОРІЄНТОВАНОГО НАВЧАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ ДИСЦИПЛІН ДЛЯ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ-МЕХАНІКІВ

Дослідження вказує на актуальність та важливість вдосконалення підходів до навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків з урахуванням їхніх професійних потреб та реальних викликів сучасної індустрії. Аналіз сучасних методів навчання дозволяє виявити недоліки та прогалини в підготовці здобувачів вищої освіти, а рекомендації щодо інтеграції математичних дисциплін з інженерною практикою, використання інноваційних методів навчання, адаптації до індивідуальних потреб та співпраці з промисловістю можуть значно покращити якість підготовки майбутніх інженерів-механіків.

Ключові слова: професійно орієнтоване навчання; математика; інженери-механіки; інтеграція; інноваційні методи; адаптація; ефективність.

Табл.: 3. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Професійно орієнтоване навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків є ключовим елементом підготовки висококваліфікованих фахівців, які здатні успішно застосовувати математичні знання у вирішенні інженерних завдань. Такий підхід сприяє формуванню глибокого зв'язку між теоретичними математичними концепціями та їхніми практичними застосуваннями. В умовах швидкої зміни технологій і методів важливо навчити здобувачів вищої освіти самостійно оновлювати та поглиблювати свої знання у сфері математики та інженерії. Узагалі, професійно орієнтоване навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків сприяє глибокому розумінню математичних концепцій та їхньому практичному застосуванню. Воно допомагає здобувачам розвивати критичне мислення, аналітичні та творчі навички, необхідні для вирішення складних інженерних завдань у реальному житті.

У сучасному суспільстві використання комп'ютера знаходить все нові можливості. Важко уявити, що інженерні розрахунки, керування сучасною технікою, виконання робіт з оптимізації, навчальний процес, дослідження можливі без комп'ютерів. Вони допомагають людині досягти реальних результатів швидше, більш ефективно, а для цього потрібні математичні знання.

Постановка проблеми. Постановка проблеми професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків виходить із необхідності забезпечити якісну підготовку фахівців, здатних ефективно вирішувати складні інженерні завдання, що вимагають високого рівня математичної компетентності.

Однією з ключових проблем є відсутність зв'язку між теоретичними знаннями з математичних дисциплін та їхнім практичним застосуванням у реальних інженерних завданнях. Майбутні інженери-механіки, які навчаються традиційним способом, можуть мати деяке розуміння математичних концепцій, але часто важко з їхньою допомогою адаптуватися до нових сучасних технологій і розробляти інноваційні рішення.

Іншою важливою проблемою є недостатня практична підготовка майбутніх інженерів-механіків до роботи з сучасними інженерними інструментами, такими як обчислювальна техніка, спеціалізоване програмне забезпечення, симуляційні платформи тощо. Відсутність навичок роботи з цими інструментами може суттєво обмежити можливості майбутніх фахівців у реалізації інженерних проєктів.

Також зростання технологій та інновацій у сучасному інженерному середовищі призводить до потреби в розумінні нових математичних методів та підходів, що може вимагати перегляду та оновлення навчальних програм.

Необхідно також звернути увагу на індивідуалізацію навчання, оскільки здобувачі вищої освіти можуть мати різний рівень підготовки та інтереси. Рівень математичної підготовки здобувачів може значно варіювати, що ускладнює викладання та вимагає індивідуального підходу до навчання. Важливо забезпечити належну увагу як обдарованим здобувачам вищої освіти, так і тим, хто потребує додаткової підтримки.

Брак практичних зав'язків між математичними концепціями та їхнім застосуванням у реальних інженерних задачах може зменшити зацікавленість здобувачів і утруднити їхнє розуміння матеріалу.

Таким чином, головною проблемою є вдосконалення підходів до навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків з метою забезпечення їхньої глибокої математичної компетентності, здатності до практичного застосування знань та ефективного розв'язання сучасних інженерних викликів.

Однак розробка ефективних методів професійно орієнтованого навчання математики може допомогти подолати ці проблеми та підготувати кваліфікованих інженерів-механіків, які зможуть успішно застосовувати математичні знання у своїй роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків акцентують на практичному підході, що базується на реальних інженерних завданнях та використовує візуальні та інтерактивні засоби для кращого розуміння абстрактних математичних концепцій. Адаптація навчання до індивідуальних потреб здобувачів вищої освіти, використання сучасних технологій, партнерства з промисловістю, ігрові елементи та практичні завдання допомагають забезпечити більш ефективний та мотивувальний процес навчання, підготовлюючи майбутніх інженерів-механіків до реальних викликів індустрії.

Протягом останнього десятиліття в Україні здійснюється модернізація системи вищої освіти, основною метою якої є підвищення якості підготовки фахівців високого рівня. Провідними професійно значущими якостями спеціаліста в сучасному суспільстві є його професійна компетентність, конкурентоспроможність, здатність до ефективного вирішення завдань. У зв'язку з цим особлива роль відводиться оновленню змісту в закладах вищої освіти (ЗВО) професійної освіти з метою приведення її у відповідність до вимог суспільства та ринку праці, переосмислення цілей і результатів освіти.

Від якості математичної підготовки значною мірою залежить рівень сформованості професійно орієнтованої компетентності майбутніх інженерів-механіків. Отже, математичну підготовку майбутніх інженерів-механіків у ЗВО слід активізувати в напрямку формування професійно орієнтованого навчання математики для майбутніх інженерів-механіків.

Аналіз наукових досліджень, порівняння результатів аналізу і їх узагальнення, а також емпіричний аналіз процесу навчання математичних дисциплін у ВНЗ, виявив недостатню розробленість методичних підходів до організації навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків, яке спрямоване на формування професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків.

Традиційно при засвоєнні математичних дисциплін майбутні інженери-механіки повинні вивчати її на лекціях, лабораторних і практичних заняттях. Саме використання комп'ютерів та відповідних програмних продуктів і дозволяє вдосконалити навчальний процес (та освіту загалом), надаючи йому інтенсивності та професійно орієнтованого навчання [4-7; 9].

Перехід ЗВО від традиційної до інноваційної цифрової форми передбачає комплекс нормативних, організаційних, економічних та соціальних заходів. У 2020 році через пандемію COVID-19, в умовах запровадження у ЗВО змішаного та дистанційного навчання вітчизняні університети змушені були перейти в середовище цифрової освіти.

Українські університети постали перед низкою викликів, а саме:

- пошуком моделі цифровізації кожним закладом вищої освіти в межах визначеної автономії;
- необхідністю формування оптимальної структури закладу вищої освіти та поєднання складників цієї структури в ефективну систему, на основі якої і формується цифровий університет;
- поєднанням елементів інформаційно-комунікаційних технологій, що є в кожному університеті, у систему, на основі якої і формується цифровий університет, і технічних засобів навчання у дієві мережеві інструменти;
- визначенням ролі, завдань і видів діяльності для наукових, науково-педагогічних і педагогічних працівників такого університету;
- заміною традиційного «аудиторного» освітнього простору на віртуально-мережевий;
- пошуком відповідних освітнім завданням методів і прийомів дистанційного навчання;
- налагодженням ефективної комунікації всіх учасників освітнього процесу в мережевому середовищі [1].

Стратегія розвитку вищої освіти в Україні потребує змін у законодавчому й нормативно-правовому регулюванні з урахуванням вимог європейської системи, освітніх стандартів і сертифікації [14-18].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Протягом минулих досліджень у галузі навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків було розглянуто багато аспектів, однак є кілька ключових областей, які лише починають вивчатися. Однією з них є інтеграція міждисциплінарних зав'язків між математичними концепціями та іншими інженерними дисциплінами, такими як механіка, електроніка чи матеріалознавство. Важливість здатності інженера-механіка бачити пов'язаність та застосовувати математичні методи в різних інженерних контекстах стає все більш очевидною.

Питанням математичної підготовки здобувачів технічних спеціальностей ЗВО присвячено чимало робіт провідних українських математиків-методистів (В. Гнеденка, В. Клочка, Т. Крилової, Л. Кудрявцева, З. Слєпкань, В. Треногіна, Н. Яруткіна та інші). Проблемам професійної підготовки фахівців вищої школи в Україні присвячено праці А. Алексюка, А. Беляєвої, В. Бикова, В. Бондар, С. Гончаренко, Р. Гуревича, С. Сисоєвої, А. Цини, М. Шкіля, П. Підкасистого, О. Романовського, К. Катханова, В. Кременя, Л. Товажнянського, Д. Тхоржевського, С. Шапоринського, Н. Шиян та ін. До проблеми підготовки інженерів в Україні та закордоном зверталось багато дослідників [2; 3; 6; 8-13].

Вони однак не в тому, що забезпечення належного контролю за процесом і результатами навчальної діяльності здобувачів виступає одним із факторів ефективного навчання вищої математики. Проте вирішення цієї проблеми цілком залежить від тих соціальних запитів, які постають перед вищою школою на тому чи іншому етапі розвитку суспільства. Нині – період інтенсивного оновлення системи вищої освіти, тому нового звучання набувають і проблеми професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків.

З урахуванням швидкого розвитку технологій, дослідження професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків потребує аналізу того, як нові технології можуть вплинути на навчальний процес і які математичні методи необхідно для цього вивчати.

Мета статті. Головною метою дослідження є поглиблений аналіз, виявлення недосліджених аспектів та висунення рекомендацій для подальшого вдосконалення підходів до навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків, з орієнтацією на їхні професійні потреби та вимоги сучасної індустрії.

Крім того, дослідження покладається і на пошук ідей та рекомендацій для вдосконалення процесу навчання математичних дисциплін. Це включає в себе розробку інноваційних підходів, які підкреслюють практичний зв'язок математичних знань із реальними інженерними задачами, а також пропозиції щодо використання нових технологій та інтерактивних засобів для полегшення навчання та зростання мотивації майбутніх інженерів-механіків.

Виклад основного матеріалу. У зв'язку зі збільшенням масштабу завдань, які вирішують інженери-механіки, відбувається кардинальна зміна інженерної діяльності в цілому, змінюються і набувають нового сенсу зміст, мета та функції інженерної праці.

Необхідність удосконалення підготовки інженерних кадрів продиктована також попитом суспільства на висококваліфікованих фахівців широкого профілю, здатних навчатися самостійно у процесі праці.

Професійно орієнтоване навчання математики для майбутніх інженерів-механіків є актуальною та важливою задачею у сучасному освітньому контексті. Інженерна діяльність вимагає від фахівців не лише глибокого розуміння математичних концепцій, але і їхнє практичне застосування в рішенні реальних інженерних задач. Однак є недосліджені аспекти, які варто розглянути для покращення якості навчання та підготовки майбутніх інженерів-механіків до інженерної практики (таблиця 1).

Таблиця 1

Ключові підходи до оптимізації процесу навчання майбутніх інженерів-механіків з акцентом на реальну інженерну практику

Ключовий підхід	Опис
1. Інтеграція математичних дисциплін з інженерною практикою	Вивчення взаємозв'язку між математичними концепціями та практичними інженерними завданнями. Визначення того, які саме математичні знання та методи є необхідними для ефективного розв'язання конкретних інженерних викликів, що може допомогти краще адаптувати навчальні програми до реальних потреб практики.
2. Інноваційні методи навчання	Розвиток інноваційних методів навчання, які базуються на практичних завданнях та реальних інженерних проєктах. Використання інтерактивних симуляцій, візуалізацій та інших сучасних педагогічних засобів може зробити процес навчання цікавішим та ефективнішим.
3. Роль індивідуалізації та адаптації	Враховання різних темпів навчання, стилів вивчення та підходів до математики може сприяти більш ефективному засвоєнню матеріалу майбутніми інженерами-механіками.
4. Використання сучасних технологій	Застосування віртуальних лабораторій, симуляцій, ігрових елементів, онлайн-курси та платформи можуть забезпечити майбутніх інженерів-механіків зручними інструментами для вивчення математики та її практичного використання і активізації інтересу здобувачів вищої освіти
5. Оцінка ефективності навчання	Аналіз ефективності нових підходів до навчання та їх вплив на підготовку інженерів-механіків. Вимірювання засвоєння математичних знань, розвитку практичних навичок та підвищення мотивації майбутніх інженерів-механіків допоможе визначити ефективність нових методів.

Розглянемо їх більш детально.

1. *Інтеграція математичних дисциплін з інженерною практикою* є ключовим аспектом професійно орієнтованого навчання майбутніх інженерів-механіків. Цей підхід спрямований на забезпечення того, щоб математичні знання та навички не були вивчені тільки як абстрактні концепції, але й могли бути застосовані на практиці для розв'язання реальних інженерних задач. Інтеграція математики з інженерною практикою має декілька ключових аспектів:

- *контекстуалізація математичних концепцій*: Математичні поняття та методи вивчаються у контексті конкретних інженерних завдань. Замість того, щоб вивчати математику ізольовано від реальних ситуацій, майбутні інженери-механіки знаходять практичні застосування математичних ідей для вирішення реальних проблем;

- *практичні інженерні завдання*: У навчанні використовуються реальні інженерні завдання, які вимагають використання математичних понять. Майбутні інженери-механіки аналізують, моделюють та розв'язують ці завдання, використовуючи математичні методи;

- *використання інженерних інструментів*: Майбутні інженери-механіки залучаються до використання різних інженерних інструментів, таких як програми для чисельних розрахунків, комп'ютерні симуляції, графічні представлення. Це допомагає показати, як математика використовується для реальних інженерних досліджень та проєктів;

- *розвиток критичного мислення*: Інтеграція математичних дисциплін з інженерною практикою допомагає стимулювати критичне мислення здобувачів вищої освіти. Вони повинні аналізувати результати, перевіряти відповідність практичних розв'язки з теоретичними концепціями та працювати над удосконаленням рішень;

- *трансдисциплінарний підхід*: Інтеграція математичних дисциплін з інженерною практикою сприяє зближенню різних дисциплін. Майбутні інженери-механіки бачать, як математика взаємодіє з фізикою, механікою, технічним дизайном та іншими інженерними аспектами;

- *реальність інженерної дійсності*: Майбутні інженери-механіки отримують можливість бачити, як математика є невід'ємною частиною реальної інженерної дійсності. Вони спостерігають, як математичні поняття використовуються для проектування, виготовлення та тестування різних інженерних продуктів.

2. *Інноваційні методи навчання* в контексті професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків сприяють покращенню якості освіти, забезпечують ефективніше засвоєння матеріалу та підготовку здобувачів вищої освіти до реальних викликів інженерної практики.

Цей підхід спрямований на забезпечення того, щоб математичні знання та навички не були вивчені тільки як абстрактні концепції, але й могли бути застосовані на практиці для розв'язання реальних інженерних задач. Інтеграція математики з інженерною практикою має декілька ключових аспектів:

- *проблемне навчання*: Майбутнім інженерам-механікам пропонуються реальні інженерні задачі, які вони повинні розв'язати за допомогою математичних знань та методів. Цей підхід розвиває критичне мислення, адаптаційні навички та здатність до самостійного вирішення проблем;

- *проектне навчання*: Майбутні інженери-механіки працюють над інженерними проектами, у яких математика використовується для розробки та оптимізації рішень. Цей підхід допомагає засвоїти матеріал через практичний досвід та співпрацюють у команді;

- *інтерактивні симуляції*: Використання комп'ютерних симуляцій дозволяє майбутнім інженерам-механікам експериментувати з математичними концепціями, спостерігати результати та розуміти, як вони впливають на інженерні процеси;

- *персоналізоване навчання*: Застосування адаптивних платформ та програм дозволяє налаштувати навчання під індивідуальні потреби та рівень засвоєння кожного здобувача;

- *використання візуалізацій*: Використання графіків, діаграм та візуальних засобів допомагає зрозуміти абстрактні математичні концепції через їхнє візуальне подання;

- *колаборативне навчання*: Групові проекти, спільне розв'язання задач та обговорення математичних концепцій сприяють взаєморозумінню та виробленню комунікативних навичок;

- *ігри та елементи гейміфікації*: Використання грифікації, тобто введення елементів гри у навчальний процес, може підвищити мотивацію та зацікавленість майбутніх інженерів-механіків;

- *використання інтерактивних платформ*: Онлайн-платформи, де майбутні інженери-механіки можуть взаємодіяти з матеріалом через відеоуроки, тестування та завдання, сприяють більш гнучкому та цікавому навчанню.

3. *Роль індивідуалізації та адаптації* у професійно орієнтованому навчанні математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків є важливою для забезпечення ефективного та збалансованого навчання кожного здобувача. Ці аспекти допомагають врахувати індивідуальні потреби, рівень підготовки та стиль навчання кожного здобувача. Декілька аспектів ролі індивідуалізації та адаптації в процесі навчання:

- *урахування рівня підготовки*: Майбутні інженери-механіки можуть мати різний рівень засвоєння математичних понять. Індивідуалізований підхід дозволяє викладачам адаптувати матеріал та завдання, щоб вони відповідали рівню засвоєння кожного здобувача вищої освіти;

- *різні стилі навчання*: Кожен майбутній інженер-механік має свій власний стиль навчання - одному більше підходить візуальне подання матеріалу, іншому - практичні завдання. Індивідуалізація допомагає пропонувати різні підходи до навчання для різних здобувачів вищої освіти;

- *темп навчання*: Деякі майбутні інженери-механіки можуть швидше освоювати матеріал, інші потребують додаткового часу. Індивідуалізація дозволяє налаштувати темп навчання для кожного здобувача вищої освіти окремо;

- *врахування інтересів та мети*: Кожен майбутній інженер-механік може мати свої інтереси та кінцеву мету - деякі можуть бути зацікавлені в певних аспектах математики через їхню відносність до майбутньої інженерної практики. Індивідуалізація допомагає забезпечити збільшення мотивації та зацікавленості здобувачів вищої освіти;

- *оцінка прогресу*: Індивідуалізація дозволяє здійснювати більш точну оцінку прогресу кожного майбутнього інженера-механіка. Викладачі можуть визначити, які аспекти матеріалу вже засвоєні, а які потребують додаткового вивчення;

- *формат навчання*: Індивідуалізація також може включати вибір формату навчання – чи то через відеоуроки, інтерактивні платформи або навіть практичні майстер-класи.

4. Використання сучасних технологій є невід'ємною частиною професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків. Сучасні технології допомагають зробити навчання більш доступним, цікавим та ефективним. Ось декілька способів, які демонструють роль сучасних технологій у цьому процесі:

- *інтерактивні симуляції та віртуальні лабораторії*: Завдяки сучасним програмам та платформам, майбутні інженери-механіки можуть експериментувати з різними математичними концепціями у віртуальних середовищах. Вони можуть спостерігати, які зміни відбуваються при зміні параметрів, та відчути практичні аспекти математики;

- *онлайн-курси та відеоуроки*: Сучасні платформи надають доступ до великої кількості онлайн-курсів та відеоуроків з математичних дисциплін. Це дозволяє майбутнім інженерам-механікам вивчати матеріал у зручний для них час та темп;

- *інтерактивні платформи та додатки*: Додатки та платформи, які містять візуалізації, інтерактивні завдання та тести, допомагають майбутнім інженерам-механікам активно взаємодіяти з матеріалом та перевіряти свої знання;

- *використання обчислювальної техніки*: Використання програм для чисельних розрахунків, символьних обчислень та інших математичних інструментів допомагає майбутнім інженерам-механікам вирішувати складні завдання та розробляти моделі;

- *онлайн-співпраця та форуми*: Сучасні технології дозволяють майбутнім інженерам-механікам обговорювати математичні концепції, розв'язувати завдання та співпрацювати над проєктами у віртуальних середовищах;

- *віртуальні та доповнені реальності*: Віртуальна реальність (VR) та доповнена реальність (AR) - це сучасні технології, які створюють імерсивне середовище для користувачів, де вони можуть взаємодіяти з об'єктами та інформацією у віртуальному або доповненому до реального світу. Майбутні інженери-механіки можуть взаємодіяти з 3D-моделями, симуляціями та іншими об'єктами для кращого розуміння математичних та інженерних концепцій;

- *гейміфікація*: Елементи грифікації можуть бути використані для створення мотивації та зацікавленості до вивчення математичних дисциплін;

- *онлайн-тести та оцінювання*: Сучасні платформи дозволяють проводити онлайн-тести та відстежувати прогрес майбутніх інженерів-механіків.

5. Оцінка ефективності навчання є важливим кроком у процесі професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків. Це дозволяє визначити, наскільки успішно досягнуті поставлені цілі, якість засвоєння матеріалу здобувачами вищої освіти та ефективність використаних педагогічних методів. Розглянемо декілька способів оцінки ефективності навчання:

- *академічна успішність*: Один з основних показників ефективності - академічні оцінки, які отримали майбутні інженери-механіки після закінчення курсу. Вони відображають рівень засвоєння матеріалу;

- *задоволеність майбутніх інженерів-механіків*: Проведення опитувань чи анкет серед здобувачів вищої освіти дозволяє оцінити їхнє задоволення якістю навчання, матеріалом, методами та викладачами;

- *відстеження прогресу*: Слідкування за змінами в навчальних досягненнях майбутніх інженерів-механіків протягом курсу дозволяє виявити, як ефективно вони освоюють матеріал;

- *зовнішні оцінки*: Відстеження того, як майбутні інженери-механіки впорядковуються в змаганнях, конкурсах, професійних екзаменах або реальних інженерних проєктах, може служити показником їхньої підготовки та ефективності навчання;

- *порівняння з попередніми роками*: Порівняння показників ефективності з попередніми роками може показати, чи вдалося досягти покращення результатів;

- *порівняння з аналогічними програмами*: Порівняння програми навчання майбутніх інженерів-механіків з аналогічними програмами в інших ВНЗ допоможе зрозуміти, наскільки конкурентоспроможна ваша програма;

- *рівень самостійності*: Оцінка здатності майбутніх інженерів-механіків самостійно вирішувати проблеми та застосовувати математичні знання у практичних завданнях;

- *задоволеність роботодавців*: Зворотний зв'язок від випускників та роботодавців щодо підготовки майбутніх інженерів-механіків до інженерної практики.

Професійно орієнтоване навчання математичних дисциплін є ключовим елементом в підготовці майбутніх інженерів-механіків до ефективної роботи в інженерних сферах. Для досягнення цієї мети можна розглянути дидактичну модель, яка об'єднує сучасні методи навчання з використанням математичних концепцій та інженерних завдань (табл. 2).

Таблиця 2

Дидактична модель професійно орієнтованого навчання математики для інженерів-механіків

Складові моделі	Опис
1	2
<i>Крок 1</i> : Діагностика потреб здобувачів вищої освіти	Перший етап полягає у з'ясуванні індивідуальних потреб та рівня підготовки здобувачів вищої освіти. Це може бути досягнуто за допомогою тестувань, анкетування або обговорення зі здобувачами їхніх професійних інтересів та очікувань
<i>Крок 2</i> : Визначення професійно орієнтованих математичних концепцій	На цьому етапі визначаються математичні концепції, які є ключовими для інженерної практики. Ці концепції можуть включати диференціальні рівняння, векторний аналіз, матриці та інші
<i>Крок 3</i> : Практичні інженерні завдання	Майбутнім інженерам-механікам надаються реальні інженерні завдання, які вимагають застосування вивчених математичних концепцій. Ці завдання можуть бути здійснені в команді або індивідуально
<i>Крок 4</i> : Інтерактивні симуляції та візуалізації	Застосування сучасних технологій, таких як віртуальні лабораторії чи інтерактивні симуляції, дозволяє майбутнім інженерам-механікам відчувати реальний вплив математичних концепцій на інженерні процеси
<i>Крок 5</i> : Проектне навчання та інтердисциплінарні завдання	Майбутнім інженерам-механікам пропонуються проєкти, які потребують комбінування знань з математики з іншими інженерними дисциплінами. Це сприяє розвитку цілісного розуміння інженерних завдань
<i>Крок 6</i> : Формування навичок комунікації	Однією з ключових навичок для інженера є здатність ефективно спілкуватися з колегами та замовниками. Учасники можуть презентувати свої рішення та аргументувати їх за допомогою математичних аспектів
<i>Крок 7</i> : Оцінка та рефлексія	Кожен етап супроводжується оцінкою здобутого знання та навичок. Майбутні інженери-механіки аналізують свої досягнення та визначають, що ще потрібно покращити
<i>Крок 8</i> : Інтеграція з інженерною практикою	Створення місткого зв'язку між математичними концепціями та їхнім застосуванням у реальних інженерних ситуаціях. Це може включати вирішення завдань, що базуються на реальних проєктах, а також аналіз інженерних проблем з використанням математичних підходів

Закінчення табл. 2

1	2
<i>Крок 9:</i> Індивідуалізація та адаптація	Враховуючи індивідуальні особливості здобувачів, надання можливості вибору завдань або підходів, що відповідають їхнім професійним інтересам та потребам
<i>Крок 10:</i> Використання сучасних технологій	Інтеграція сучасних технологій, таких як віртуальні лабораторії, програмні платформи для чисельних розрахунків та візуалізаційних інструментів, для активного залучення здобувачів вищої освіти до вивчення математичних дисциплін
<i>Крок 11:</i> Гейміфікація	Використання елементів грифікації для стимулювання мотивації та зацікавленості майбутніх інженерів-механіків до вивчення математичних дисциплін. Введення балів, рівнів, нагород, змагань тощо може позитивно впливати на активність здобувачів вищої освіти
<i>Крок 12:</i> Порівняння з реальним досвідом	Проведення практичних відкритих занять, екскурсій, лекцій від інженерів-практиків, які діляться своєю робочою реальністю та застосуванням математичних підходів у своїй роботі
<i>Крок 13:</i> Оцінка та зворотний зв'язок	Проведення оцінювання ефективності навчання з використанням різних методів, включаючи тестування, анкетування, підготовку проєктів, та отримання зворотного зв'язку від здобувачів вищої освіти та викладачів

Ця дидактична модель спрямована на підготовку майбутніх інженерів-механіків до вдалих інженерних кар'єр, де вони зможуть застосовувати свої математичні знання та навички в реальних інженерних ситуаціях. Для вирішення методичних проблем формування професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків потрібно мати на увазі формування та засвоєння здобувачами вищої освіти узагальнених способів дій, які могли б бути перенесені до його майбутньої професійної галузі. І в кожній математичній дисципліні, що викладається майбутнім інженером-механіком, необхідно відшукувати способи реалізації цієї методичної ідеї. Інакше не буде реалізовано професійно орієнтований підхід до освіти у його розумінні.

Основною характеристикою компетенції випускника закладу вищої освіти є трансформація способів навчальної діяльності на професійний рівень, тобто оволодіння здобувачем вищої освіти не просто набором знань, умінь та навичок у певній галузі, а й узагальненими способами дій застосування наявних знань та вмінь для вирішення поставлених перед ним професійних та соціальних завдань.

Професійно орієнтоване навчання передбачає готовність та здатність майбутніх інженерів-механіків системно та організовано вирішувати проблеми та завдання, а також аналізувати результати своєї професійної діяльності на основі отриманих у процесі навчання знань та умінь.

Формування професійних компетенцій починається ще у навчальному закладі (школі, закладі вищої освіти) і продовжує формуватися протягом усієї професійної діяльності.

Професійно орієнтоване навчання математичних дисциплін відповідають сучасним процесам, які відбуваються у світі. Тому необхідно звернути увагу на процеси суспільно-політичного, науково-технічного та морального порядку, які відбуваються у світі в цілому і в нашій країні і істотно впливають на сферу освіти загалом, включаючи і сферу вищої освіти.

Тому на початковому етапі вивчення математичних дисциплін, враховуючи специфіку знань майбутніх інженерів-механіків про свою майбутню професійну діяльність, необхідно формування позитивної мотивації до вивчення математики, що має професійний вектор. Розвиток позитивної навчальної мотивації є одним із центральних характеристик навчальної діяльності здобувачів вищої освіти, а також умов, що сприяють формуванню математичних компетенцій, особистісного розвитку та ефективного професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків.

При формуванні позитивної пізнавальної мотивації майбутніх інженерів-механіків до вивчення математичних дисциплін необхідно створювати такі умови, при яких вивчення математичних дисциплін мало б внутрішній зміст для здобувача вищої освіти, формування його пізнавального мотиву. Зовнішні мотиви (наказ батьків, викладачів, обов'язок та інше) неспроможні забезпечити формування пізнавальної мотивації.

Для майбутніх інженерів-механіків математична реальність представляється за допомогою навчальних математичних матеріалів: записів лекцій, підручників, навчальних та методичних посібників, електронних ресурсів, які запропоновані для вирішення завдань (типових розрахунків, контрольних робіт), математичних програмних продуктів тощо. Вивчаючи математику у закладі вищої освіти, майбутні інженери-механіки узагальнюють наявні шкільні знання та отримують нові знання. При вивченні математичних розділів діяльність здобувачів орієнтована на роботу з математичними матеріалами, у процесі якої здобувачів вищої освіти знайомлять з узагальненими математичними конструкціями та об'єктами. Таким чином, враховуючи специфіку математичної діяльності майбутніх інженерів-механіків щодо математики, організацію процесу навчання необхідно направити в русло формування у здобувачів прийомів роботи з навчальним математичним матеріалом, які відповідають прийомам, що застосовуються в майбутньому для професійної діяльності інженера.

Нині є та доступно для використання велика кількість математичного матеріалу різного виду (підручники та навчальні посібники за напрямом навчання, відеолекції різних розділів математики, математичні програми на вирішення завдань та інше). Тому важливим завданням професійно орієнтованого навчання стає вибір оптимального навчального математичного матеріалу, вивчення якого буде достатньо для досягнення мети вивчення.

Інтеграція інженерних завдань та математичної підготовки в системі професійно орієнтованого навчання інженерів-механіків є важливою складовою для підготовки майбутніх фахівців до успішної інженерної діяльності. Цей підхід допомагає здобувачам вищої освіти не лише засвоювати математичні концепції, але й розуміти їхній практичний застосунок у реальних інженерних завданнях.

Будь-який навчальний матеріал виконує одночасно кілька функцій: інформативну, знану, розвиваючу, інтегративну, пізнавальну.

Тому навчальні математичні матеріали є оптимальним засобом розвитку професійно орієнтованого навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків.

Встановлення відповідності між професійною діяльністю інженера-механіка та навчальною математичною діяльністю майбутнього інженера-механіка є ключовим для ефективного професійно орієнтованого навчання. Навчальна програма повинна забезпечувати вивчення математичних концепцій, які дійсно необхідні для виконання інженерно-механічних завдань.

Зауважимо, що чітку відповідність між математичною діяльністю та майбутньою професійною діяльністю інженера-механіка провести практично неможливо, тому що будь-який вид професійної діяльності інженера-механіка включає в себе і ґрунтується на синтезі складових математичної діяльності (табл. 3). Проте можна виділити деякі основні складові в кожному вигляді діяльності (навчальної математичної та майбутньої професійної) та зіставити їх.

Математична діяльність для майбутнього інженера-механіка є інструментом для опису технічних процесів, оскільки інженерні науки користуються математикою для моделювання ситуацій у виробництві, щодо розрахунків, прогнозування технологічних результатів. Для інженерів-механіків математична діяльність цінна як мова, якою можна сформулювати та вирішити свої професійні завдання, тому якісне засвоєння математичних методів, законів та понять є невід'ємною частиною підготовки кваліфікованих майбутніх інженерів-механіків, які застосовуватимуть математичні методи для вирішення важливих професійних завдань.

Таблиця 3

*Відповідність між професійною діяльністю інженера-механіка
та навчальною математичною діяльністю для майбутнього інженера-механіка*

Професійна діяльність інженера-механіка		Навчальна математична діяльність для майбутнього інженера-механіка	
Вид	Основні складові	Вид	Основні складові
1	2	3	4
1. Розрахунково-проектна діяльність	<ul style="list-style-type: none"> - збір та аналіз інформаційних вихідних даних для проектування; - розрахунок та проектування деталей та вузлів відповідно до технічного завдання; - розробка проектної та робочої технічної документації, оформлення закінчених проектно-конструкторських робіт; - Проведення попереднього техніко-економічного обґрунтування проектних розрахунків та інше 	1. Діяльність щодо вирішення задач	<ul style="list-style-type: none"> - знання структури та системи співвідношень між досліджуваними математичними поняттями, властивостями, методами; - уміння перебудовувати та знаходити нові прийоми рішення математичних завдань; - складання математичних моделей найпростіших процесів та явищ; - вирішення завдань у нестандартних ситуаціях
2. Експериментально-дослідницька діяльність	<ul style="list-style-type: none"> Вивчення науково-технічної інформації, вітчизняного та закордонного досвіду з теми дослідження; - математичне моделювання процесів та об'єктів на базі стандартних пакетів автоматизованого проектування та досліджень; - Проведення експериментів по заданій методиці та аналіз результатів; - проведення вимірювань та спостережень, складання опису проведених досліджень, підготовка даних для складання оглядів, звітів та наукових публікацій. 	2. Діяльність з перетворення математичної інформації	<ul style="list-style-type: none"> - самостійне використання основної та додаткової математичної літератури; - вміння користуватися символічною мовою математики; - перетворення словесного та графічного матеріалу в математичні вирази і назад, використовуючи зв'язки між математичними матеріалами; - Проведення розрахунків у рамках побудованої моделі дослідження та оцінювання точності розрахунків; - використання комп'ютерних математичних програм для розв'язання математичних завдань.
3. Організаційно-управлінська діяльність	<ul style="list-style-type: none"> - складання технічної документації (графіків робіт, інструкцій, планів, кошторисів, заявок на матеріали, обладнання тощо), а також встановленої звітності за затвердженими нормами; - Організація роботи малих колективів виконавців; - виконання робіт зі стандартизації та підготовки до сертифікації технічних засобів, систем, процесів, обладнання та матеріалів; - підготовка вихідних даних для вибору та обґрунтування науково-технічних та організаційних рішень на основі економічних рішень та ін. 	3. Діяльність з логічного обґрунтування математичних виразів	<ul style="list-style-type: none"> - побудова схематичних креслень до завдань, графіків функцій заданих у різний спосіб; - вміння логічно обґрунтовувати твердження та висновки; - вміння інтерпретувати та переформулювати дану математичну модель для подальшого дослідження.

Професійно орієнтоване навчання математичних дисциплін для інженерів-механіків є критичним аспектом підготовки майбутніх фахівців. Математика відіграє ключову роль у розв'язанні інженерних завдань та розробці нових технологій.

Висновки. Загалом ця робота наголошує на необхідності змін у підходах до навчання математики майбутніх інженерів-механіків, спрямованих на практичну користь та адаптацію до вимог сучасної індустрії. Результати цього дослідження можуть послужити основою для розробки нових навчальних програм, методик та підходів, які сприятимуть

зміцненню компетентностей майбутніх інженерів-механіків та їхній успішній інтеграції в індустріальний сектор. Отже, професійно орієнтоване навчання математики для інженерів-механіків є важливою складовою підготовки кваліфікованих фахівців, і впровадження сучасних методів та підходів може покращити ефективність такого навчання та підготувати здобувачів вищої освіти до успішної інженерної кар'єри.

Професійно орієнтоване навчання математичних дисциплін для майбутніх інженерів-механіків потребує подальших досліджень та інноваційних підходів. Вирішення недосліджених аспектів може покращити якість підготовки фахівців та забезпечити їх готовність до вирішення складних інженерних завдань у сучасному світі.

Список використаних джерел

1. Арешонков, В. Ю. Цифровізація вищої освіти: виклики та відповіді / В. Ю. Арешонков // Вісник НАПН України. – 2020. – Т. 2, № 2. – С. 1-6.
2. Біла книга національної освіти України / Т. Ф. Алексеєнко, В. М. Аніщенко, Г. О. Балл [та ін.]; за заг. ред. В. Г. Кременя; НАПН України. – Київ: Інформ. системи, 2010. – 342 с.
3. Волкова, Н. П. Моделювання компетентнісної професійної освіти в контексті євроінтеграції / Н. П. Волкова, Н. П. Іванова, О. О. Лаврентьєва; за заг. ред. Н. П. Волкової. – Дніпро: Університет ім. А. Нобеля, 2021. – 356 с.
4. Гарасимів, Т. З. Аксиологічні засади сучасної університетської освіти: правові підходи: монографія. / Т. З. Гарасимів, В. З. Чернописька, Н. В. Кучеренко. – Львів: Сполом, 2021. – 192 с.
5. Дяденчук, А. Ф. Міжпредметні зв'язки фізики і математики при вивченні інтегрального числення / А. Ф. Дяденчук, Л. В. Халанчук // Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації: матеріали Міжнар.наук.-практ. інтернет-конф. (м. Мелітополь, 27-29 трав. 2020 р.). – Мелітополь: ТДАТУ, 2020. – С. 102-107.
6. Дяденчук, А. Ф. Візуалізація задач диференціального числення при підготовці студентів інженерних спеціальностей / А. Ф. Дяденчук, Л. В. Халанчук // Класичні та прикладні математичні проблеми у наукових дослідженнях здобувачів вищої освіти і молодих вчених: історичний та сучасний аспекти: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молод. вчених (м. Харків, 9-10 квіт. 2020 р.). – Харків: ХНАДУ, 2020. – С. 114-117.
7. Кіндратець, О. Проблеми цифрової трансформації освіти [Електронний ресурс] / О. Кіндратець // Освіта як чинник формування креативних компетентностей в умовах цифрового суспільства: збірка тез міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запоріжжя, 27-28 листопада 2019 р.). – Запоріжжя: ЗНУ, 2019. – С. 59-60. – Режим доступу: <https://web.znu.edu.ua/NIS//2019/zbirka-tez.pdf>.
8. Михальченко, Д. О. Анімаційне моделювання храпових механізмів для створення обертового переривчастого руху / Д. О. Михальченко // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі: Всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспір. та молод. учених. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – С. 22-23.
9. Дистанційна форма здобуття вищої освіти: аналіз думки студентів щодо якості, переваг та недоліків / С. А. Мороз, О. Г. Романовський, В. М. Мороз, С. М. Домбровська, Л. М. Грен, А. Л. Помаза-Пономаренко // Інформаційні технології та засоби навчання. – 2020. – № 79 (5). – С. 276-295. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v79i5.3340>.
10. Мурашківська, В. П. Окремі аспекти формування професійної компетентності майбутніх інженерів-механіків у процесі математичної підготовки у ВНЗ / В. П. Мурашківська, С. П. Казнадій // Фізико-математична освіта. – 2018. – Вип. 4 (18). – С. 121-126.
11. Мурашківська, В. П. Формування професійної компетентності майбутніх інженерів-механіків / В. П. Мурашківська, С. П. Казнадій // Наукова діяльність як шлях формування професійних компетентностей майбутнього фахівця (НПК-2018): матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Суми, 6-7 груд. 2018 р.): у 2-х ч. – Суми: [ФОП Цьома С. П.], 2018. – Ч. 2. – С. 43-44.
12. Вивчення рівняння Бернуллі із застосуванням інформаційних технологій (анімаційний симулятор) / Г. Пасов, Н. Сіра, О. Следнікова, А. Кологойда, В. Мурашківська // Технічні науки та технології. – 2021. – № 3(25). – С. 45-54.

13. Рідей, Н. М. Модель формування професійної компетентності майбутніх автомеханіків у процесі вивчення професійно орієнтованих дисциплін / Н. М. Рідей, О. І. Макієвський // Стратегія післядипломної освіти для сталого розвитку : колектив. монограф. ; за ред. Н. М. Рідей. – Київ : ЦП Компринт, 2020. – С. 110-125.

14. Симоненко, С. П. Українська освіта в умовах цифрової трансформації суспільства: вибір стратегії розвитку [Електронний ресурс] / С. П. Симоненко // Гілея. Філософські науки. – 2020. – Вип. 153, № 2. – С. 374-377. – Режим доступу: <http://gileya.org/download.php?id=221>.

15. Шинкарук В. Основні напрями модернізації структури вищої освіти України [Електронний ресурс] / В. Шинкарук // Офіційний сайт Міністерства освіти і науки України. – Режим доступу: <http://www.mon.gov.ua>.

16. Про вищу освіту [Електронний ресурс] : Закон України від 01.07.2014 № 1556-VII. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text>.

17. Затверджені стандарти вищої освіти [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України. – Режим доступу: <https://mon.gov.ua/ua/osvita/visha-osvita/naukovo-metodichna-rada-ministerstva-osviti-i-nauki-ukrayini/zatverdzeni-standarti-vishoyi-osviti>.

18. Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2021–2031 роки [Електронний ресурс]. – Київ, 2020. – Режим доступу: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/rizne/2020/09/25/rozvitku-vishchoi-osviti-v-ukraini-02-10-2020.pdf>.

19. Удосконалення фінансування системи освіти України як передумова успішного реформування : монографія / за ред. С. Л. Лондара ; ДНУ «Інститут освітньої аналітики». – Київ, 2021. – 274 с.

References

1. Areshonkov, V.Yu. (2020). Tsyfrovizatsiia vyshchoi osvity: vyklyky ta vidpovidi [Digitization of higher education: challenges and answers]. *Visnyk NAPN Ukrainy – Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2(2), 1–6

2. Kremen, V.H. (Ed.). (2010). *Bila knyha natsionalnoi osvity Ukrainy [White book of national education of Ukraine]*. Inform. systemy.

3. Volkova, N.P. (Ed.). (2021). *Modeliuvannia kompetentnisnoi profesiinoi osvity v konteksti yevrointehratsii [Modeling of competence professional education in the context of European integration]*. Universytet im. A. Nobelia.

4. Harasymiv, T.Z., Chornopyska, V.Z., Kucherenko, N.V. (2021). *Aksiologichni zasady suchasnoi universytetskoï osvity: pravovi pidkhody [Axiological principles of modern university education: legal approaches]*. Spolom.

5. Diadenchuk, A.F., Khalanchuk, L.V. (2020). Mizhpredmetni zviazky fizyky i matematyky pry vyvchenni intehralnoho chyslennia [Interdisciplinary connections of physics and mathematics in the study of integral calculus]. *Rozvytok suchasnoi nauky ta osvity: realii, problemy yakosti, innovatsii: materialy Mizhnar.nauk.-prakt. internet-konf. – Development of modern science and education: realities, quality problems, innovations: materials of International .science and practice Internet Conf.* (pp. 102–107). T DATU.

6. Diadenchuk, A.F., Khalanchuk, L.V. (2020). Vizualizatsiia zadach dyferentsialnoho chyslennia pry pidhotovtsi studentiv inzhenernykh spetsialnostei [Visualization of problems of differential calculus in the preparation of students of engineering specialties]. *Klasychni ta prykladni matematychni problemy u naukovykh doslidzhenniakh zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh vchenykh: istorychnyi ta suchasnyi aspekty: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf. zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh vchenykh – Classical and applied mathematical problems in scientific research of students of higher education and young scientists: historical and modern aspects: materials of the All-Ukrainian science and practice conf. university graduates education and youth scientists* (pp. 114–117). KhNADU.

7. Kindratets, O. (2019). Problemy tsyfrovoi transformatsii osvity [Problems of digital transformation of education]. *Osvita yak chynnnyk formuvannia kreatyvnykh kompetentnostei v umovakh tsyfrovoho suspilstva: zbirka tez mizhnar. nauk.-prakt. konf. – Education as a factor in the formation of creative competences in the conditions of a digital society: a collection of theses of international science and practice conf.* (pp. 59–60). ZNU. <https://web.znu.edu.ua/NIS//2019/zbirka-tez.pdf>.

8. Mykhalchenko, D.O. (2017). Animatsiine modeliuвання khrapovykh mekhanizmiv dlia stvorennia obertalnoho pereryvchastoho rukhu [Animation modeling of ratchet mechanisms for creating rotary intermittent motion]. *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh «Novitni tekhnologii u naukovii diialnosti i navchalnomu protsesi» – Latest technologies in scientific activity and the educational process: Vseukr. science and practice conf. student, aspir. and young scientists* (pp. 22-23). ChNTU.

9. Moroz, S.A., Romanovskiy, O.H., Moroz, V.M., Dombrovska, S.M., Hren, L.M., Pomaza-Ponomarenko, A.L. (2020). Dystantsiina forma zdobuttia vyshchoi osvity: analiz dumky studentiv shchodo yakosti, perevah ta nedolikiv [Distance form of higher education: analysis of students' opinion regarding quality, advantages and disadvantages]. *Informatsiini tekhnologii ta zasoby navchannia – Information technologies and teaching aids*, (79(5)), 276-295. <https://doi.org/10.33407/itlt.v79i5.3340>.

10. Murashkovska, V.P., Kaznadii, S.P. (2018). Okremi aspekty formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh inzheneriv-mekhanikiv u protsesi matetmtychnoi pidhotovky u VNZ [Separate aspects of the formation of professional competence of future mechanical engineers in the process of mathematical training at universities]. *Fyzyko-matematychna osvita – Physical and mathematical education*, 4(18), 121-126.

11. Murashkovska, V.P., Kaznadii, S.P. (2018). Formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh inzheneriv-mekhanikiv [Formation of professional competence of future mechanical engineers]. *Naukova diialnist yak shliakh formuvannia profesiinykh kompetentnostei maibutnoho fakhivtsia (NPK-2018): materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Scientific activity as a way of formation of professional competence of the future specialist (NPK-2018): materials of the International . science and practice conf.* (Vol. 2, pp. 43–44).

12. Pasov, H., Sira, N., Sliednikova, O., Kolohoida, A., Murashkovska, V. (2021). Vyvchennia rivniannia Bernulli iz zastosuvanniam informatsiinykh tekhnologii (animatsiinyi symuliyator) [Studying the Bernoulli equation using information technologies (animation simulator)]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi – Technical sciences and technologies*, (3(25)), 45-54.

13. Ridei, N.M., Makiievskiy, O.I. (2020). Model formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh avtomekhanikiv u protsesi vyvchennia profesiino oriyentovanykh dystsyplin [Model of formation of professional competence of future auto mechanics in the process of studying professionally oriented disciplines]. In N.M. Ridei (Ed.), *Stratehiia pislidyplomnoi osvity dlia staloho rozvytku – Strategy of post-graduate education for sustainable development* (pp. 110-125).

14. Symonenko, S.P. (2020). Ukrainska osvita v umovakh tsyfrovoyi transformatsii suspilstva: vybir stratehii rozvytku [Ukrainian education in the conditions of digital transformation of society: choosing a development strategy]. *Hileia: naukovyi visnyk. Filosofski nauky – Gileya. Philosophical sciences*, 153(2), 374–377. <http://gileya.org/download.php?id=221>.

15. Shynkaruk, V. (n.d.). *Osnovni napriamy modernizatsii struktury vyshchoi osvity Ukrainy [The main directions of modernization of the structure of higher education of Ukraine]*. <http://www.mon.gov.ua>.

16. Pro vyshchu osvitu [On higher education], Law of Ukraine dated July 1, 2014 № 1556-VII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text>.

17. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy [Ministry of Education and Science of Ukraine]. (n.d.). *Zatverdzeni standarty vyshchoi osvity [Approved standards of higher education]*. <https://mon.gov.ua/ua/osvita/visha-osvita/naukovo-metodichna-rada-ministerstva-osviti-i-nauki-ukrayini/zatverdzeni-standarti-vishoyi-osviti>.

18. *Stratehiia rozvytku vyshchoi osvity v Ukraini na 2021–2031 roky [Strategy for the development of higher education in Ukraine for 2021–2031]*. (2020). <https://mon.gov.ua/storage/app/media/rizne/2020/09/25/rozvitku-vishchoi-osviti-v-ukraini-02-10-2020.pdf>.

19. Londar, S.L. (Ed.). (2021). *Udoskonalennia finansuvannia systemy osvity Ukrainy yak peredumova uspishnoho reformuvannia [Improving the financing of the education system of Ukraine as a prerequisite for successful reform]*. DNU «Instytut osvitnoi analityky».

Отримано 15.02.2024

Gennadiy Pasov¹, Antonina Kolohoida², Svitlana Korniienko³, Vira Murashkovska⁴

¹ PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. **ResearcherID:** [H-4455-2014](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

² PhD, Associate Professor of the Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kolohoida@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>. **ResearcherID:** [I-1118-2014](https://orcid.org/0000-0002-1742-2686)

³ PhD, Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Mathematical Modeling
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: cornel@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9162-1229>. **ResearcherID:** [AAV-4708-2020](https://orcid.org/0000-0002-9162-1229)

⁴ Senior Lecturer of the Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vmurashkovska@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0556-8709>. **ResearcherID:** [G-9757-2016](https://orcid.org/0000-0002-0556-8709)

THEORETICAL FOUNDATIONS OF PROFESSIONALLY-ORIENTED EDUCATION OF MATHEMATICAL DISCIPLINES FOR FUTURE MECHANICAL ENGINEERS

Research and training of professional-oriented mathematical skills of mechanical engineers remains extremely relevant. Mechanical engineering remains one of the key industries where a good understanding and application of mathematical concepts is crucial.

Currently, the use of computers in the educational process opens up wide opportunities. Therefore, modern professional training of mechanical engineers requires a deep understanding of mathematical concepts and their application in real engineering tasks.

Current research in mathematics education for mechanical engineers emphasizes a hands-on approach based on real engineering tasks and uses visual and interactive tools to better understand abstract mathematical concepts.

Given the rapid changes in the industry and the development of new technologies, there is a need to develop learning approaches that allow students to quickly adapt to new challenges and situations.

The purpose of the article is to analyze and systematize the key theoretical aspects related to the integration of mathematics in the study of engineering mechanics in order to prepare specialists for successful professional activity.

The current state of studying mathematics for mechanical engineers is analyzed.

This study indicates the relevance and importance of improving approaches to the study of mathematical disciplines, taking into account professional needs and real challenges of modern industry. The analysis of modern teaching methods allows to identify shortcomings in the training of students, and recommendations on the integration of mathematical disciplines with engineering practice, the use of innovative teaching methods, adaptation to individual needs and cooperation with industry can significantly improve the quality of training of future mechanical engineers.

Key words: *professional-oriented training; mathematics; mechanical engineers; integration; innovative methods; adaptation; efficiency.*

Table: 3. References: 19.

Одарка Прохоренко¹, Іван Лагодзінський²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: dariawelding@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2589-7056>
ResearcherID: [J-4556-2017](https://orcid.org/0000-0003-2589-7056). SCOPUS Author ID: [57765152000](https://orcid.org/0000-0003-2589-7056)

²аспірант, асистент кафедри зварювального виробництва
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: i.lahodzynski@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7986-9440>
ResearcherID: [JZT-5376-2024](https://orcid.org/0000-0002-7986-9440). SCOPUS Author ID: [57221758864](https://orcid.org/0000-0002-7986-9440)

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ АДИТИВНОМУ MIG НАПЛАВЛЕННІ КРЕМНІЄВОЮ БРОНЗОЮ CuSi3Mn1

Досліджено напружено-деформований стан адитивно згенерованих виробів із застосуванням кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 (БрКМц3-1). Розроблена скінченно-елементна модель, на базі якої виконане числове моделювання пошарового наплавлення просторового виробу. Досліджено зміни температурного поля та виявлено, що характер зміни температур і величина її зменшення у відповідному шарі після наплавлення наступних шарів є однаковими і не залежать від траєкторії наплавлення. Встановлено, що для нижніх (1-4 шар) та верхніх (останніх) шарів характерний об'ємний напружений стан, який призводить до утворення тріщин на стадії охолодження в діапазоні температур 475–550 °C при зменшенні межі міцності наплавленого матеріалу $\sigma_b < 170$ МПа.

Ключові слова: WAAM; GMAW; напружено-деформований стан; адитивні технології; CuSi3Mn1; пошарове наплавлення.

Рис.: 14. Табл.: 3. Бібл.: 26.

Актуальність теми дослідження. Дугове адитивне виробництво або Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) – це метод тривимірного друку металу, який заснований на пошаровому дуговому наплавленні. Gas Metal Arc Welding (GMAW) або дугове зварювання з використанням плавкого присадного дроту у захисних газах є одним з різновидів WAAM технологій. Переваги WAAM-GMAW способу полягають у досить високій швидкості наплавлення шарів, простоті налаштування обладнання та практично відсутності обмежень у габаритах генерованих виробів [1].

Однак, висока швидкість наплавлення у поєднанні зі значним тепловкладенням та нерівномірністю усадки наплавлених шарів під час охолодження, яка залежить від геометрії запланованого профілю виробу, збільшують вірогідність утворення значних за величиною залишкових напружень та деформацій у готових виробах [2]. Проблеми формоутворення (надмірна хвилястість поверхні), які пов'язані зі значною шорсткістю готової поверхні та необхідністю значного припуску для наступної обробки після наплавлення, можуть бути вирішені різними технологічними методами: зміною складу захисних газових сумішей [3] або застосуванням їх комбінації з різними методами GMAW наплавлення [4].

Постановка проблеми. Водночас проблеми утворення залишкових напружень та деформацій при пошаровому наплавленні за дослідженнями [5; 6], є основними через потужне тепловкладення, що є особливістю WAAM процесу. Запропоновані [7; 8] практичні підходи для вирішення проблем, пов'язаних з утворенням залишкових напружень обмежені здебільшого розробкою стратегій щодо вибору траєкторії наплавлення для зменшення концентрації напружень і вирішують проблему локально. Ситуація погіршується в разі збільшення кількості наплавлених шарів, оскільки розсіювання тепла після наплавлення останнього шару зменшується внаслідок локального підігріву від раніше наплавлених шарів. Надлишкове тепло накопичується у попередніх шарах, що призводить до нерівномірної зміни структур під час повторного нагріву.

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) під час використання WAAM технологій переважно присвячені матеріалам, які широко застосовуються у промисловості [9] та представлені в більшій кількості низьковуглецевими [10; 11] і нержавіючими сталями [12; 13], ніж кольоровими металами і сплавами.

Враховуючи досить високу вартість мідних сплавів, є сенс у використанні WAAM технологій для виготовлення заготовок необхідних деталей зі зменшеною кількістю відходів металообробки при виготовленні кінцевого виробу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кремнієві бронзи типу CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) широко використовуються у машинобудуванні завдяки своїм антифрикційним, жаростійким, корозійно стійким та пружинним властивостям. такий сплав має гарну зварність завдяки вмісту марганцю в кількості 1,0...1,5 % та використовується для зварювання-паяння біметалевих систем Fe-Ti [14], міді, паяння низьковуглецевих і нержавіючих сталей [15]. Однак, вміст кремнію (2,7...3,5 %) у складі сплаву підвищує рідкотекучість при наплавленні, що спричиняє нерівномірність формування поверхні при адитивному виготовленні.

Автори досліджень [16] вказують на анізотропію характеристик CuSi3Mn1 під час адитивного наплавлення чотирьох шарів, що спровоковано структурним ростом довгастих стовпчастих зерен з орієнтацією в напрямку тепловідведення в процесі кристалізації. Поєднання рідкотекучості, високого коефіцієнта теплового розширення та значної усадки під час кристалізації, сприяє утворенню значних залишкових напружень та деформацій при пошаровому адитивному наплавленні. У роботі [17] спостерігається відрив пошарово наплавленого зразка від основи внаслідок деформування від усадки сукупності попередніх наплавлених шарів. У попередніх дослідженнях [18] адитивного наплавлення плоского вертикального зразка CuSi3Mn1 при використанні імпульсної подачі зварювального струму, зафіксовано виникнення великої кількості вертикальних поперечних тріщин. На думку авторів, така поведінка кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 спровокована структурними перетвореннями, які спричиняють анізотропію механічних властивостей матеріалу й тимчасовими напруженнями під час наплавлення.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Застосування експериментальних методів визначення НДС виробів, виготовлених за допомогою WAAM технологій досить ускладнене, а іноді і неможливе, у зв'язку зі складною геометрією об'ємних виробів чи необхідністю руйнування (вирізання) частини готового виробу, що може бути неприйнятним. Для обчислення або дослідження НДС у адитивно згенерованих виробках, для планування стратегії пошарового наплавлення з метою вирішення проблем, пов'язаних з утворенням залишкових напружень і деформацій, використовують розрахунок методом скінченних елементів (МСЕ). МСЕ дозволяє розв'язати задачу термопружнопластичності з урахуванням характерних для модельованого процесу наплавлення/зварювання граничних умов, зміни теплофізичних і механічних властивостей досліджуваних матеріалів у широкому діапазоні температур. Попередні дослідження [19; 20] підтверджують доцільність використання МСЕ у спеціалізованих програмних комплексах типу Simufact Welding, ANSYS, WeldPrediction, Sysweld та інших.

Враховуючи вищевказані проблеми, зумовлені термодіформацийними процесами та структурними перетвореннями у бронзі марки CuSi3Mn1 під час адитивного наплавлення об'ємних виробів, дослідження параметрів НДС є актуальним завданням.

Метою дослідження є аналіз напружено-деформованого стану адитивно наплавлених методом GMAW виробів із кремнієвої бронзи CuSi3Mn (БрКМц3-1) та встановлення причини виникнення критичних дефектів у вигляді тріщин.

Основні задачі дослідження. Виготовити зразок пошаровим дуговим наплавленням із застосуванням GMAW методу і дротом з CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) суцільного перерізу у середовищі чистого аргону (100 % Ar) на підкладці з аустенітної нержавіючої сталі E304.

Побудувати термічні цикли на основі експериментальних даних, отриманих з використанням термопар. Зафіксувати режими наплавлення кожного шару зразка та геометричні характеристики отриманих шарів для подальшого використання при скінченно-елементному моделюванні процесу.

Розробити й верифікувати скінченно-елементну модель наплавленого зразка.

Виконати теоретичний аналіз параметрів напружено-деформованого стану наплавленого зразка з CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) для визначення причини виникнення дефектів типу «тріщина».

Виклад основного матеріалу. Дослідний зразок виготовляли методом GMAW наплавлення з використанням трикоординатного CNC-стенда (рис. 1, а) і зварювального джерела Fronius VarioStar 2500. Для наплавлення на основу – пластину завтовшки 6 мм у вигляді рівнобічного трикутника з довжиною кожної сторони 110 мм з аустенітної нержавіючої сталі E304, використано дріт CuSi3Mn1 (БрКМц3-1) діаметром $d_e = 1,2$ мм. Основа жорстко закріплена короткими швами завдовжки 20 мм на прямокутній підкладці розмірами 114×98×10 мм, яка виготовлена з низьковуглецевої сталі марки Ст3сп (рис. 1, б).

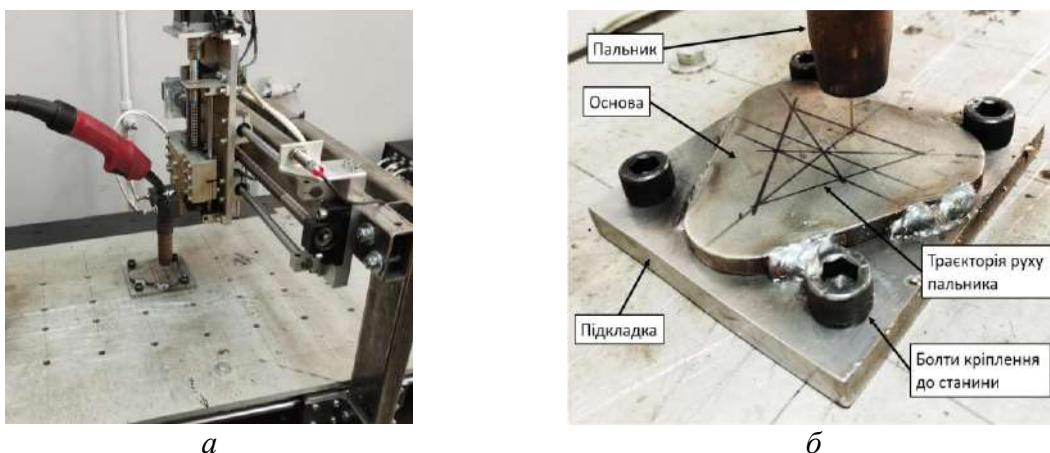


Рис. 1. Обладнання та методика наплавлення:

а – стенд для наплавлення швів;

б – траєкторія руху пальника при пошаровому наплавленні

Незмінюваними параметрами режиму наплавлення є швидкість наплавлення $V_{за} = 10$ мм/сек та швидкість подачі дроту $V_{пл.} = 75$ мм/сек. Зі збільшенням кількості наплавлених шарів спостерігаються зміни струму та напруги режиму наплавлення окремих шарів (табл. 1), що відповідає відомим даним [20] про досягнення стаціонарного режиму наплавлення після 6–7 шару. Зафіксовані для кожного окремого шару (табл. 1) режими під час експериментального наплавлення призми використані для вирішення МСЕ теплової задачі.

Таблиця 1 – Параметри режимів наплавлення шарів

№ проходу	Дріт	Захисний газ	Погонна енергія, Дж/мм	Струм, А	Напруга, В	Діаметр сопла, мм	Швидкість подачі дроту $V_{пл.}$, мм/сек	Швидкість наплавлення $V_{за}$, мм/сек	Витрати газу, л/хв
1	CuSi3Mn1 (БрКМц3-1)	100 % Ar	164,6	124	16,6	16	75	10	15
2			164,6	124	16,5				
3			164,6	124	16,6				
4			162,3	123	16,6				
5			163,9	122	16,8				
6			151,8	113	16,8				
7			146,0	108	16,9				
8			147,3	109	16,9				
9			146,0	108	16,9				
10			147,3	109	16,9				

Скінченно-елементне моделювання та властивості матеріалів. Розроблена скінченно-елементна модель має 32 420 елементів та 23 370 вузлів і складається з наплавлених шарів, трикутної основи завтовшки 6 мм і сторонами завдовжки 110 мм кожна та жорсткої підкладки з габаритними розмірами 114×98×10 мм. Загальна кількість наплавлених шарів – 10, висота одного шару – 1,328 мм (рис. 2). Скінченно-елементна сітка трикутної основи в зоні наплавлення першого шару бронзи згущена для підвищення точності результатів у зоні високоградієнтного впливу від джерела тепла. Розміри сітки складають: для жорсткої підкладки – 2,8×2,9×3 мм, для трикутної основи – 1,2×1×2 мм, для наплавленого шару – 1,16×1,2×0,66 мм.

Граничні умови, що визначають теплообмін між поверхнею тіла і навколишнім середовищем, задані 2D-елементами у вигляді поверхні тепловіддачі, яка моделює конвекцію і променистий теплообмін під час зварювання. Технологічне закріплення основи у процесі наплавлення та охолодження моделювали, призначивши програмно жорстке закріплення з підкладкою (рис. 2).

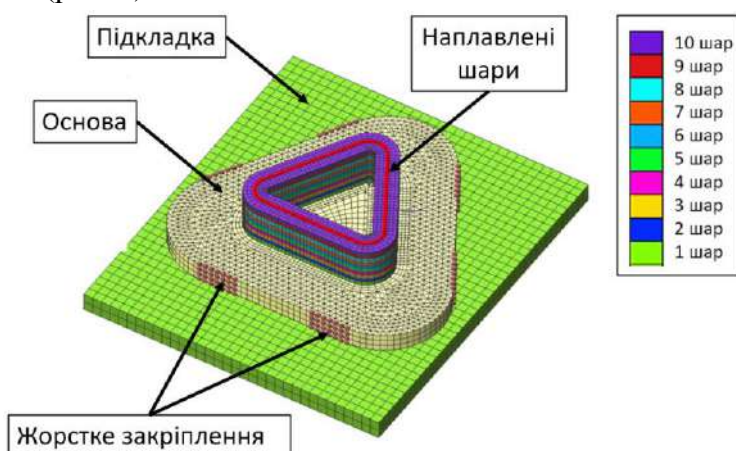


Рис. 2. Тривимірний скінченно-елементний моделювання наплавленої рівнобічної трикутної призми з основою і підкладкою

Механічні й теплофізичні характеристики для CuSi3Mn1 представлені у [22]. Термомеханічний аналіз поведінки матеріалу виконаний з урахуванням особливостей перебігу термомеханічних процесів в процесі наплавлення шарів. Числовий розв'язок задачі термопружнопластичності отриманий із використанням кривих пластичності матеріалу (рис. 3) [22].

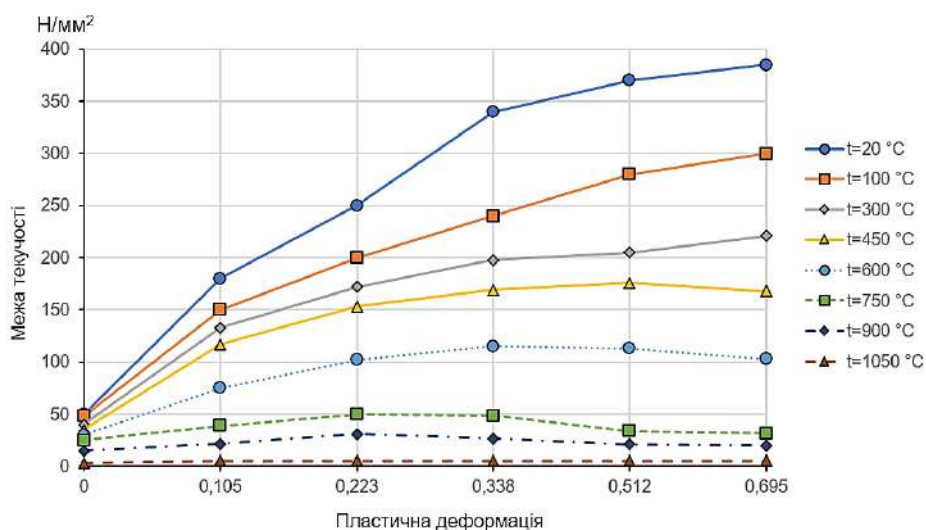


Рис. 3. Криві пластичності для CuSi3Mn1 [22]

Властивості матеріалу основи, яка виготовлена з аустенітної нержавіючої сталі (E304) наявні у базах матеріалів програмних комплексів для скінчено-елементного розрахунку та надано у [23].

Джерело тепла і термомеханічний аналіз. У зв'язку з тим, що напружено-деформований стан друкозварних виробів, які виготовлені за допомогою технології WAAM, залежить від кінетики термомодеформаційних процесів, зумовлених впливом зварювальної дуги, для числового моделювання теплових процесів необхідно використовувати відповідну модель джерела тепла. Нині в науково-дослідній практиці для аналізу теплових процесів під час дугового зварювання/наплавлення найчастіше використовують математичну модель об'ємного джерела нагріву за J. Goldak [24] у вигляді подвійного еліпсоїда, яка розроблена з урахуванням нормального (за Гауссом) закону розподілу щільності потужності джерела нагрівання в об'ємі тіла (рис. 4). Особливістю моделі є незалежне задання розподілу питомої теплової потужності для головної і хвостової частин зварювальної ванни.

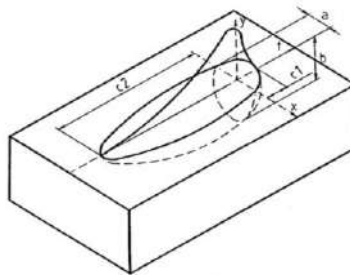


Рис. 4. Модель об'ємного джерела тепла за J. Goldak [24]

Для моделі об'ємного джерела тепла за J. Goldak, температурне поле $T(x, y, z, t)$ задовольняє диференційному нелінійному рівнянню теплопровідності в будь-якій точці тіла:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{vol}, \quad (1)$$

де $q_{vol}(x, y, z)$ – об'ємна щільність теплової потужності джерела, Вт/см³. Для описаної теплової моделі розподіл об'ємної щільності потужності джерела задається незалежно для фронтальної (індекс f) і хвостової (індекс r) чвертей еліпсоїда:

$$q_{vol,f} = f_f \frac{6\sqrt{3}Q}{a_f b c \pi^{3/2}} e^{-3 \left[\left(\frac{x+v(\tau-t)}{a_f} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right]}, \quad (2)$$

$$q_{vol,r} = f_r \frac{6\sqrt{3}Q}{a_r b c \pi^{3/2}} e^{-3 \left[\left(\frac{x+v(\tau-t)}{a_r} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right]}, \quad (3)$$

де Q – ефективна тепла потужність джерела нагрівання (для дугового наплавлення $Q = \eta \times I \times U$), τ – час, що минув від початку дії джерела; t – поточний час; v – швидкість переміщення джерела (швидкість зварювання); x, y, z – напівосі еліпсоїда за координатними напрямками Ox, Oy, Oz ; f_f і f_r – коефіцієнти, які визначають співвідношення для тепла, введеного у фронтальну та хвостову частину еліпсоїда; a_f, a_r, b, c – відповідні радіуси нормального розподілу.

Для опису умов теплообміну використовуються граничні умови виду:

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = h [T_c(\tau) - T_n(\tau)], \quad (4)$$

де n – нормаль до поверхні; h – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, який враховує теплообмін конвекцією і випромінюванням; T_c і T_n – температура навколишнього середовища і поверхні відповідно. Індекс n належить до значень на поверхні.

Крайова задача (1) – (2) проінтегрована при початковій умові:

$$T(x, y, z) = T_0, \quad (5)$$

де T_0 – початкова температура.

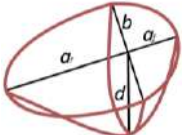
Розв’язок задачі теплопровідності з використанням МСЕ зводиться до мінімізації функціоналу, який описує крайову задачу (1) – (5). Для групи кінцевих елементів це приводить до такого матричного рівняння [25]:

$$[C] \frac{\{T\}}{\partial \tau} + [K] \{T\} = \{F\}, \tag{6}$$

де $[C]$, $[K]$ – глобальні матриці теплоємності і теплопровідності; $\{T\}$ – вектор-стовпець температур у вузлах скінченно-елементної сітки; $\{F\}$ – вектор-стовпець теплового навантаження у вузлах.

Параметри режимів для моделювання джерела тепла (зварювальний струм – I та напруга на дузі – U) обираємо для кожного шару відповідно до таблиці 1, а геометричні розміри джерела - відповідають значенням експерименту та вказані у таблиці 2. ККД для GMAW джерела тепла взято з [26].

Таблиця 2 – Параметри моделі джерела тепла для MIG наплавлення

Спосіб наплавлення		a_f , мм	a_r , мм	b , мм	d , мм	$\eta_{ккд}^*$	f_f
MIG		2	6	3,5	1,7	0,8	0,5

Дослідження теплового і напружено-деформованого стану виконано для моделі рівнобічної тригранної призми зі стороною завдовжки 50 мм. Така модель дозволяє оцінити вплив та розподіл нерівномірного теплового навантаження для криволінійної траєкторії руху джерела тепла по замкненому контуру (рис. 2, а) [21].

Для експериментального аналізу термічних циклів були встановлені 3 термопари (тип К, розмір спаю $d = 1,2$ мм, крок температурного розширення $0,25$ °C) зі зворотної сторони основи на траєкторії руху пальника, як показано на рис. 5. Зняття показів та запис температур по 3 точкам виконано за допомогою системи збору даних на базі мікроконтролера Arduino у парі з цифровим підсилювачем MAX6675 для кожного температурного каналу. Траєкторію наплавлення моделювали аналогічно експериментальному варіанту: наплавлення всіх 10 шарів виконували у поступальному напрямку для кожного шару (рис. 5, а).

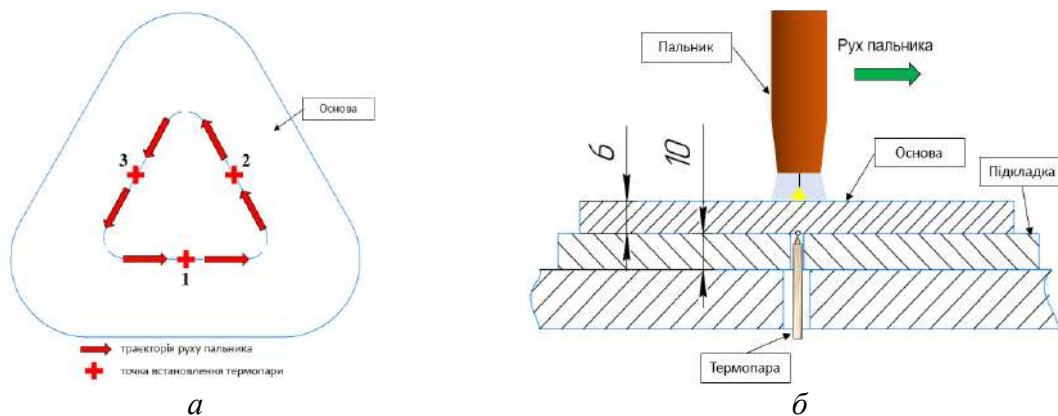


Рис. 5. Схема наплавлення:

а – розташування термопар і траєкторії руху пальника;
б – поперечний переріз місця встановлення термопар

Верифікація скінченно-елементної моделі виконана шляхом порівняння термічних циклів, отриманих при експериментальному пошаровому наплавленні й у результаті числового розрахунку. Порівняння модельних та експериментальних термічних циклів показано на рис. 6.

Як видно з рис. 6, значення пікових температур термічних циклів змодельованого процесу наплавлення майже збігаються зі значеннями, отриманими під час експерименту. Більш пологий спад температури при міжшаровому остиганні, отриманий при чис-

ловому розрахунку, пояснюється роботою розрахункового алгоритму: на стадії охолодження автоматично збільшується розрахунковий крок для зменшення загального часу розрахунку скінченно-елементної моделі.

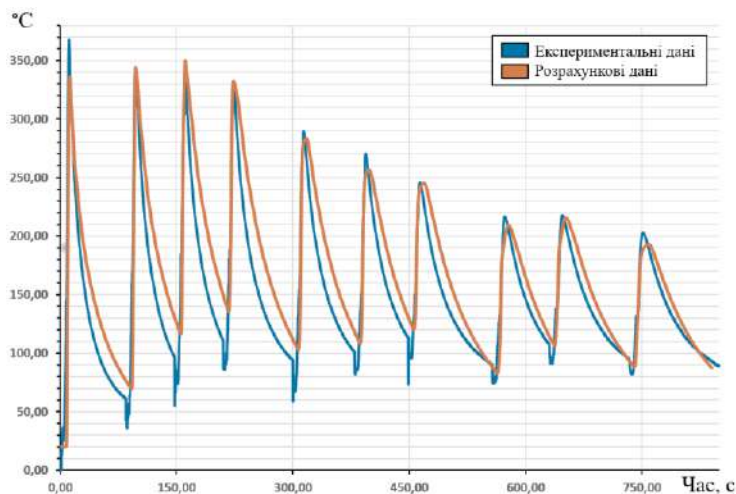


Рис. 6. Термічні цикли експериментального та змодельованого процесу пошарового наплавлення

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 7, а зображено наплавлений у ході експерименту зразок у вигляді тригранної рівнобічної призми. На рис. 7, б показано тріщини, які виникли поперек останнього шару, а також у попередніх шарах. Для виявлення тріщин у наплавленому зразку використано капілярну дефектоскопію відповідно до ДСТУ EN ISO 3452-2:2014.



а



б



в



г

*Рис. 7. Експериментальний зразок:
а – загальний вигляд наплавленого зразка; б – тріщина на останньому шарі;
в – вихід тріщини в останньому шарі з внутрішньої поверхні стінки;
г – тріщина на переході з 2-го до 3-го шару*

Наведені дефекти виникли впродовж декількох секунд після закінчення процесу наплавлення, що підтверджує попередні експериментальні дані про схильність CuSi3Mn1 до тріщиноутворення при адитивному наплавленні [13].

У результаті розв'язання методом скінченних елементів задачі термопружнопластичності при послідовному наплавленні 10 шарів для формування тригранної призми отримані кількісні значення параметрів напружено-деформованого стану для кожної точки модельного зразка під час нагрівання та охолодження. Нижче показано розподіл основних параметрів залишкового НДС по висоті призми для трьох характерних вертикальних перерізів «Nod Set 1», «Nod Set 2», «Nod Set 3» (рис. 8), які являють собою набори з 10 точок. Кожна точка розташована на поверхні відповідного шару, посередині ширини наплавленого валика і на середині довжини прямолінійної ділянки (рис. 8). Всі шари пронумеровані від 1 (нижній) до 10 (верхній) згідно з порядком їх наплавлення. Формування шарів виконували проти годинникової стрілки.

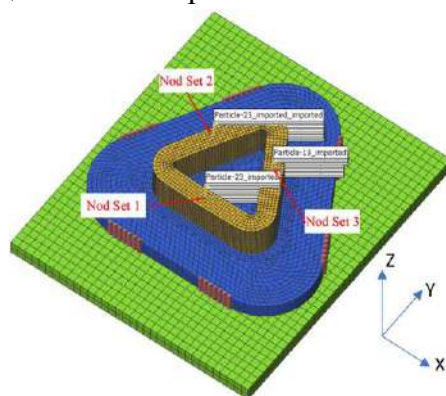


Рис. 8. Розташування характерних вертикальних перерізів для аналізу параметрів залишкового НДС тригранної призми

Зважаючи на результати експерименту, які засвідчують появу в наплавлених шарах тріщин, доцільно проаналізувати кінетику температур і еквівалентних напружень у цих шарах.

Розглянемо розподіл температур по висоті в одній із трьох граней рівнобічної призми: на прикладі «Nod Set 3». На рис. 9 зазначені кількісні значення температури у кожному шарі в момент його наплавлення, а також зміна температур в ньому по мірі наплавлення кожного наступного шару. Видно, що характер зміни температур і величина її зменшення у відповідному шарі після наплавлення наступних шарів є однаковими і не залежать від траєкторії наплавлення. Однак слід зауважити, що після наплавлення 6-го шару і наступних шарів, температура ванни в кожному з них дещо зменшується: з $1535\text{ }^{\circ}\text{C}$ під час наплавлення 1-5 шарів до $1415\text{ }^{\circ}\text{C}$ – під час наплавлення 6-10 шарів, що можна пояснити тепловідведенням у нижні наплавлені шари.

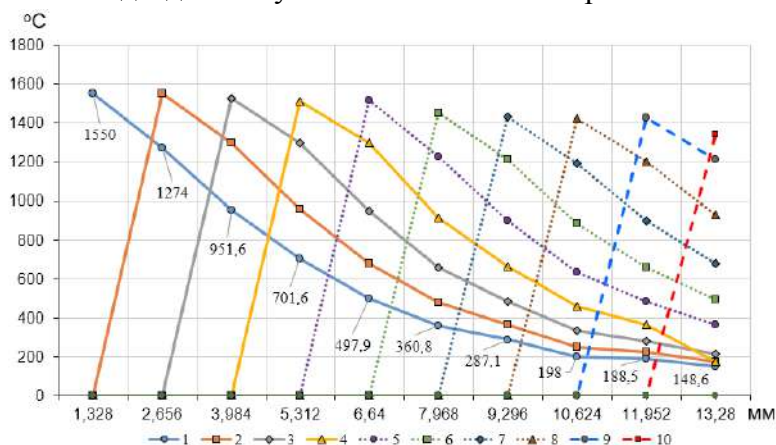


Рис. 9. Температури у наплавлених шарах для «Nod Set 3» у момент формування наступного шару

Міцнісні характеристики наплавленого металу залежать від температури згідно з рис. 10 і враховуючи цю відповідність можна бачити, що, наприклад, температури у 1-му шарі по мірі наплавлення 2-4 шарів будуть достатньо високими, щоб метал знаходився у стані знеміцнення і пластично деформувався. При наплавленні 5-го та наступних шарів температура у 1-му шарі знижується до значень 498 °С і властивості міцності матеріалу відновлюються (рис. 10). При цьому також необхідно взяти до уваги кількісну зміну значень еквівалентних напружень (рис. 11) у кожному шарі для відповідних температур і порівняти їх з границею міцності бронзи, щоб визначити можливість утворення тріщини у відповідному шарі під час охолодження.

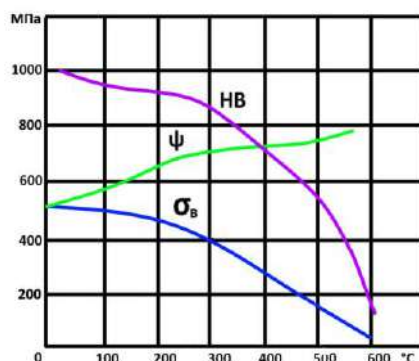


Рис. 10. Залежність механічних властивостей кремнієвої бронзи $CuSi_3Mn_1$ (БрКМц3-1) від температури [22]

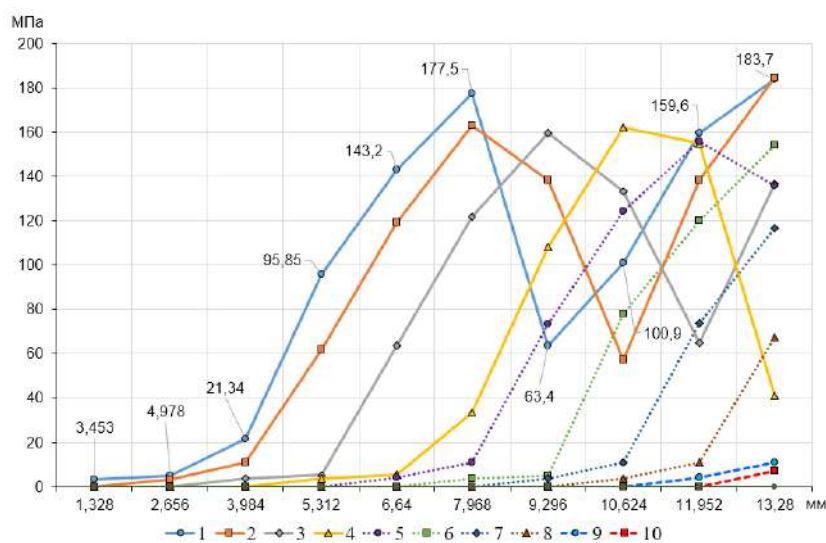


Рис. 11. Еквівалентні напруження у наплавлених шарах для «Nod Set 3» у момент формування наступного шару

У таблиці 3 показано порівняльний аналіз даних з рис. 9–11 для 1-го і 2-го шарів (Nod Set 3) для оцінки можливості утворення тріщини та визначення номеру шару, наплавлення якого призведе до утворення тріщини у 1-му і 2-му шарі.

З таблиці 3 видно, що вірогідність утворення тріщини є найвищою для 1-го і 2-го шарів у той час, коли відбувається наплавлення 5-го і 6-го шарів, оскільки в цей момент температура нагріву 1-го шару становить 497 °С і еквівалентні напруження у точці на поверхні розділу 1-го і 2-го шарів становлять 143 МПа, що становить $0,9\sigma_b$ (160 МПа) при цій температурі (рис. 10). Для 2-го шару температура нагріву в момент наплавлення 6-го шару складає 478 °С і еквівалентні напруження в точці на поверхні 2-го шару становлять 163 МПа, що становить $0,8\sigma_b$ (195 МПа) при цій температурі (рис. 10).

Таблиця 3 – Порівняння еквівалентних напружень з σ_B для кожного шару при різних температурах

№ наплавленого шару над 1-им шаром	Температура у 1-му шарі в момент проходження над ним зварювальної ванни у 2...10 шарах, °C	Границя міцності σ_B , МПа	Еквівалентні напруження у 1-му шарі, МПа	№ наплавленого шару над 2-им шаром	Температура у 2-му шарі в момент проходження над ним зварювальної ванни у 3...10 шарах, °C	Границя міцності σ_B , МПа	Еквівалентні напруження у 2-му шарі, МПа
10	148	475	183,7	10	173	450	184,5
9	188	460	159,6	9	223	425	138,5
8	198	455	100,9	8	250	450	57,38
7	287	400	63,4	7	364	315	138,2
6	360	300	177,5	6	478	195	163,1
5	497	160	143,2	5	497	180	119,2
4	701	(-)	95,85	4	681	(-)	61,76
3	951	(-)	21,34	3	957	(-)	11
2	1274	(-)	4,978	-	1297	(-)	3,225
1	1550	(-)	3,453	-	1553	(-)	-

Зважаючи на той факт, що скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану під час адитивного процесу наплавлення не передбачало врахування рівнянь, які описують процес руйнування матеріалу від впливу високотемпературних навантажень, то отримані числові значення еквівалентних напружень не можуть перевищувати границю міцності матеріалу. Разом з цим, з табл. 3 видно, що величина еквівалентних напружень у відповідних шарах моделі майже досягла границі міцності для досліджуваного матеріалу, що дозволяє зробити припущення про можливість утворення тріщини саме в цих місцях. Як видно з рис. 7, з, такі міркування підтверджуються експериментом.

Далі розглянемо особливості розподілу параметрів залишкового НДС у стінках призми. Як видно з рис. 12, найбільші значення залишкових еквівалентних пластичних деформацій формуються у 1-му наплавленому шарі (на рівні $\sim 0,067 \dots \sim 0,081$) у всіх трьох стінках призми. При цьому характер розподілу і величина деформацій у другій і третій стінках майже на 100 % збігаються, а у першій – відрізняється, що можна пояснити неусталеністю температурного режиму внаслідок початку і завершення наплавлення саме у цій стінці. У другій і третій стінках призми наплавлення шарів з 2-го по 9-ий супроводжується складною кінетикою зміни і накопичення пластичних деформацій під час нагріву і охолодження кожного шару, спричиненого багаторазовими підігрівом до температури вище 80 °C (температура початку розвитку пластичних деформацій у бронзі за умови жорсткого закріплення) і підвищенням жорсткості виробу при накладанні кожного наступного шару (рис. 12), що призводить до формування менших за величиною значень результуючих залишкових еквівалентних пластичних деформацій у кожному наступному наплавленому шарі. У 10-му шарі наявне підвищення результуючих еквівалентних пластичних залишкових деформацій, оскільки це останній за укладкою шар і повторні підігриви для нього відсутні. Подібне збільшення деформацій у 10-му шарі є також і у першій стінці, однак загальна кінетика формування залишкових пластичних деформацій має певні розбіжності, зумовлені більшою нерівномірністю нагрівання в порівнянні з другою і третьою стінками призми.

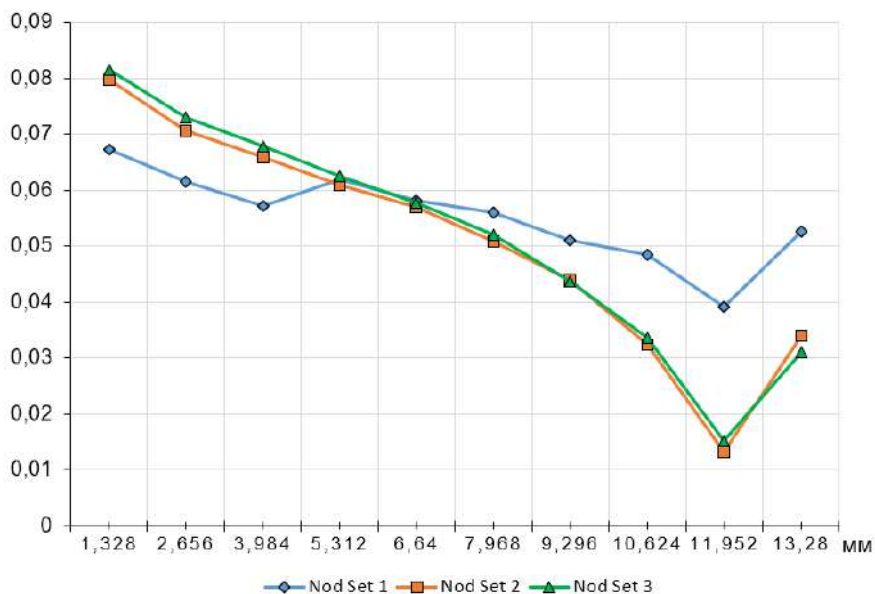


Рис. 12. Розподіл еквівалентних залишкових пластичних деформацій по висоті у трьох гранях призми для “Nod Set 1”, “Nod Set 2”, “Nod Set 3”

Аналіз залишкового напруженого стану у гранях призми на основі розподілу головних нормальних напружень (рис. 13) показав, що найбільше за величиною максимальне (перше) нормальне напруження утворюється у 4-7 наплавлених шарах (на рівні ~200...222 МПа), причому для другої і третьої граней спостерігається майже 100 % збіжність за величиною і характером розподілу, а у першій грані – наявна більша нерівномірність розподілу по висоті призми. Крім того, для всіх трьох граней простежується зміна ступеню об’ємності напруженого стану від 1-го до 10-го шару: видно, що друге і третє головні нормальні напруження зменшуються за величиною від значень $\sigma_2 = 100$ МПа і $\sigma_3 = -100$ МПа у другій і третій гранях (рис. 13) та $\sigma_2 = 81$ МПа і $\sigma_3 = 11$ МПа – у першій грані (рис. 13) до практично нульових значень у 10-му шарі. Це дозволяє стверджувати, що саме перше головне нормальне напруження, яке спрямовано вздовж відповідної наплавленої ділянки є основним чинником виникнення вертикальних, перпендикулярних наплавленому шару тріщин у гранях призми.

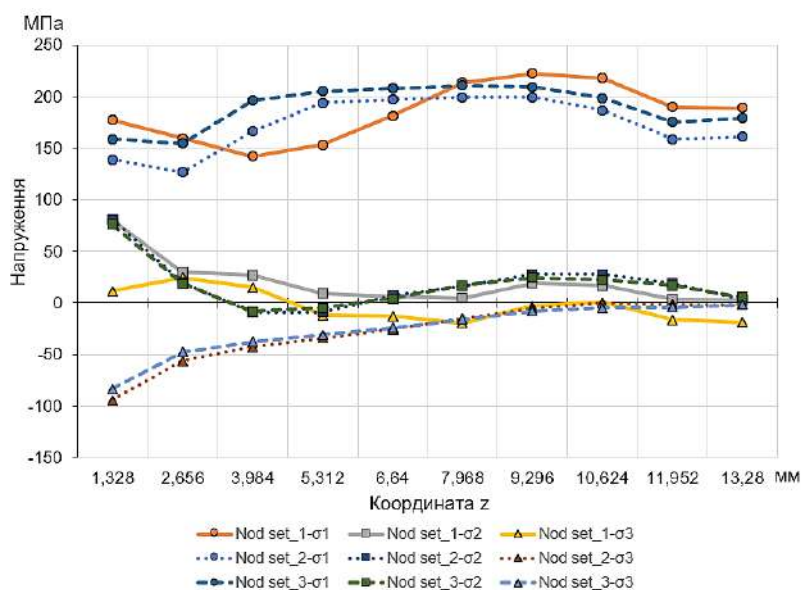


Рис. 13. Розподіл головних нормальних напружень по висоті граней призми для «Nod Set 1», «Nod Set 2», «Nod Set 3»

З рис. 14 видно, що характер розподілу залишкових еквівалентних напружень є подібним у всіх стінках на рівні 6-10 шарів, хоча величини мають розбіжність близько 10...20 % (21...38 МПа). При цьому від 6-го до 10-го шару рівень напружень зменшується: для першої стінки з 225 МПа до 199 МПа; для другої – з 201 МПа до 161 МПа; для третьої – з 213 МПа до 178 МПа. У нижніх шарах, з 1-го по 5-ий включно, характер розподілу й величина напружень є подібними лише у другій і третій стінках. Усереднена величина еквівалентних напружень у гранях призми складає 191 МПа, що більше границі текучості матеріалу (150 МПа) в 1,3 раза, але у 2,5 раза менше за границю міцності матеріалу (475 МПа), що не повинно призводити до появи тріщин у залишковому стані. Це підтверджується тим фактом, що під час експериментального наплавлення тріщини утворились на етапі охолодження попередньо наплавлених шарів, у момент, коли механічні показники CuSi3Mn1 мали менші значення, ніж при кімнатній температурі (рис. 14).

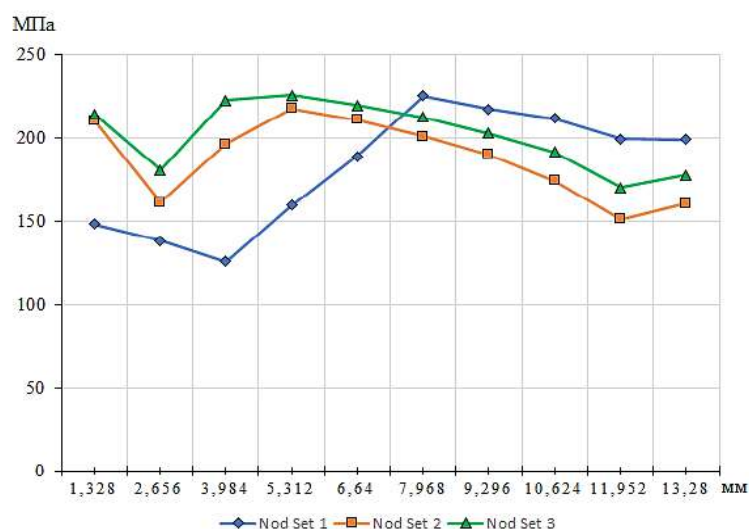


Рис. 14. Розподіл залишкових еквівалентних залишкових напружень по висоті у трьох гранях призми для «Nod Set 1», «Nod Set 2», «Nod Set 3»

Висновки. Розроблена скінченно-елементна модель об'ємної геометричної фігури у вигляді тригранної рівнобічної призми, виготовленої пошаровим наплавленням методом GMAW, яка дозволяє на основі числового розв'язку зв'язаної задачі термопружнопластичності визначати параметри напружено-деформованого стану в будь-який момент нагрівання і охолодження зразка з урахуванням хімічного складу матеріалів підложки і зварювального дроту, зміни з температурою теплофізичних і механічних властивостей матеріалів, послідовності наплавлення шарів.

На основі аналізу результатів числового моделювання виявлено, що характер зміни температур і величина її зменшення у відповідному шарі після наплавлення наступних шарів є однаковими і не залежать від траєкторії наплавлення.

Показано, що найбільші залишкові еквівалентні пластичні деформації формуються у першому шарі з поступовим зменшенням величини у кожному наступному наплавленому шарі, що пов'язано зі зменшенням ступеня об'ємності напруженого стану призми від 1-го до 10-го шару.

Встановлено, що жорсткий зв'язок підкладки з наплавленими шарами зумовлює утворення об'ємного напруженого стану в нижніх (1-4) шарах, що підвищує вірогідність появи тріщини саме в цих шарах внаслідок зменшення межі міцності матеріалу на стадії охолодження.

Список використаних джерел

1. Treutler, K. The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review / K. Treutler, V. Wesling // Applied Sciences. – 2021. – № 11(18). – P. 8619. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11188619>.

2. Analysis of material property models on WAAM distortion using nonlinear numerical computation and experimental verification with P-GMAW / Y. H. P. Manurung, K. P. Prajadhiana, M. S. Adenan, B. Awiszus, M. Graf, A. Haelsing // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2021. – № 21(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/b101137>.
3. Gurcik, T. Influence of shielding gas on geometrical quality of WAAM technology. / T. Gurcik, K. Kovanda, P. Rohan, // *METAL 2019 : 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. – 2019. – Pp. 715-721. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2019.871>.
4. Квасницький, В. В. Вплив методів GMAW і PAW адитивного дугового наплавлення та складу захисного газу на геометричні характеристики поверхонь і структуру металу виробів / В. В. Квасницький, І. М. Лагодзінський // *Автоматичне зварювання*. – 2023. – № 11. – С. 23-31. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.11.02>.
5. Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding / J. Xiong, R. Li, Y. Lei, H. Chen // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2018. – № 251. – Pp. 12-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.007>.
6. A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping / H. Zhao, G. Zhang, Z. Yin, L. Wu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – № 211(3). – Pp. 488-495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.002>.
7. Residual Stress Modeling with Phase Transformation for Wire Arc Additive Manufacturing of B91 Steel / X. Jimenez, W. Dong, S. Paul, M. A. Klecka, A. C. To // *JOM*. – 2020. – № 72(12). – Pp. 4178-4186. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04424-w>.
8. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing / C. R. Cunningham, J. M. Flynn, A. Shokrani, V. Dhokia, S. T. Newman // *Additive Manufacturing*. – 2018. – № 22. – Pp. 672-686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>.
9. Huang, C. Stress-strain curves for wire arc additively manufactured steels / C. Huang, P. Kyvelou, L. Gardner // *Engineering Structures*. – 2023. – № 279. – № 115628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115628>.
10. Performance under tensile loading of point-by-point wire and arc additively manufactured steel bars for structural components / V.A. Silvestru, I. Ariza, J. Vienne, L. Michel, A. M. Aguilar Sanchez, U. Angst, A. Taras // *Materials & Design*. – 2021. – № 205. – № 109740. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109740>.
11. Experiments and numerical simulation of wire and arc additive manufactured steel materials / H. Xin, I. Tarus, L. Cheng, M. Veljkovic, N. Persem, L. Lorch // *Structures*. – 2021. – № 34. – Pp. 1393-1402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.055>.
12. Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material / P. Kyvelou, H. Slack, D. D. Mountanou, M. A. Wadee, T. B. Britton, C. Buchanan, L. Gardner // *Materials & Design*. – 2020. – 108675. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108675>.
13. Description of anisotropic material response of wire and arc additively manufactured thin-walled stainless steel elements / N. Hadjipantelis, B. Weber, C. Buchanan, L. Gardner // *Thin-Walled Structures*. – 2022. – 171. – № 108634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108634>.
14. Study on the microstructure optimization and mechanical properties of dissimilar TC4-304L arc-brazing joints / M. Gang, H. Xueming, H. Ye, S. Chen, W. Min // *Materials Science and Engineering*. – 2020. – A, 788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139566>.
15. Joint evolution and strengthening mechanisms in arc brazed galvanised steels with Cu97Si3 filler / Z. S. Yu, R.F. Li, F.M. Zhou, M. F. Wu, K. Qi, Y. Y. Qian // *Materials Science and Technology*. 2004. – № 20(11). – Pp. 1479-1483. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708304225022133>.
16. Baby, J. Microstructural development during wire arc additive manufacturing of copper-based components / J. Baby, M. Amirthalingam, // *Welding in the World*. – 2020. – № 64. – Pp. 395-405. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00840-y>.
17. In-situ wire-feed additive manufacturing of Cu-Al alloy by addition of silicon / W. Yanhu, C. Xizhang, K. Sergey, S. Chuanchu, N. S. Arshad, G. Namrata // *Applied Surface Science*. – 2019. – № 487. – Pp. 1366-1375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.068>.
18. Лагодзінський, І. М. Особливості використання СМТ та Pulse технологій при дуговому адитивному виготовленні просторових виробів / І. М. Лагодзінський, В. В. Квасницький, А. А. Гринюк // *Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку : тези доп. V Міжнар. наук.-тех. конф. (м. Краматорськ, 19-20 жовт. 2021 р.)*. – Краматорськ : Донбаська державна машинобудівна академія, 2021. – С. 50-53.

19. Numerical simulation results of the kinetics of temperature and phase composition in a butt joint made from steel DC04 during a single-pass submerged arc welding / O. Prokhorenko, S. Hainutdinov, V. Prokhorenko, C. Pulka, V. Senchyshyn // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – № 36. – Pp. 290-297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.037>.
20. Grigorenko, G. M. Modeling of metallurgical additive process of manufacture of 09G2S steel structures / G. M. Grigorenko, V. A. Kostin, V.V. Zhukov // *Electrometallurgy Today*. – 2017. – № 2. – Pp. 35-44. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2017.02.06>.
21. Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials / V. Kvasnytskyi, V. Korzhyk, I. Lahodzinkyi, Y. Illiashenko, S. Peleshenko, O. Voitenko // *IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*. – 2020. – Pp. 02SAMA16-1–02SAMA16-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>.
22. Spittel, M. Flow stress and plasticity of CuSi3Mn / M. Spittel, T. Spittel. – Springer, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14174-4_62.
23. Handbook of Comparative World Steel Standards. – Japan : International Technical Information Institute, 2004. – 663 p.
24. Goldak, J. A. Computational Welding Mechanics / J. A. Goldak, M. Akhlagi. – Springer, 2005. – 321 p.
25. Zienkiewicz O. C. The finite element method for solid and structural mechanics / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, D. D. Fox. – Elsevier, 2014. – 657 p.
26. Haelsig, A. New Findings On The Efficiency Of Gas Shielded Arc Welding / A. Haelsig, M. Kusch, P. Mayer // *Welding in the World*. – 2012. – № 56(11-12). – Pp. 98-104. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03321400>.

References

1. Treutler, Kai, and Volker Wesling. (2021). The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review. *Applied Sciences*, 11(18), 8619. <https://doi.org/10.3390/app11188619>.
2. Manurung, Y. H. P., Prajadhiana, K. P., Adenan, M. S., Awiszus, B., Graf, M., & Haelsig, A. (2021). Analysis of material property models on WAAM distortion using nonlinear numerical computation and experimental verification with P-GMAW. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(1). <https://doi.org/10.1007/b101137>.
3. Gurcik, T., Kovanda, K., Rohan, P. (2019). Influence of shielding gas on geometrical quality of WAAM technology. *METAL 2019 - 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 715–721. <https://doi.org/10.37904/metal.2019.871>.
4. Kvasnytskyi, V.V., Lahodzinskyi, I.M. (2023). Vplyv metodiv GMAW i PAW adytyvnoho duhovoho naplavlennia ta skladu zakhysnoho hazu na heometrychni kharakterystyky poverkhon i strukturu metalu vyrobiv [Influence of GMAW and PAW methods of additive arc surfacing and shielding gas composition on surface geometry and metal structure]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic Welding, II*, 23–31. <https://doi.org/10.37434/as2023.11.02>.
5. Xiong, J., Li, R., Lei, Y., & Chen, H. (2018). Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 251, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.007>.
6. Zhao, H., Zhang, G., Yin, Z., & Wu, L. (2011). A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3), 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.002>.
7. Jimenez, X., Dong, W., Paul, S., Klecka, M. A., & To, A. C. (2020). Residual Stress Modeling with Phase Transformation for Wire Arc Additive Manufacturing of B91 Steel. *JOM*, 72(12), 4178–4186. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04424-w>.
8. Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 672–686. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>.
9. Huang C., Kyvelou P., Gardner L. (2023). Stress-strain curves for wire arc additively manufactured steels. *Engineering Structures*, 279, №115628. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115628>.
10. Silvestru, V.-A., Ariza, I., Vienne, J., Michel, L., Aguilar Sanchez, A. M., Angst, U., ... Taras, A. (2021). Performance under tensile loading of point-by-point wire and arc additively manufactured steel bars for structural components. *Materials & Design*, 205, № 109740. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109740>.

11. Xin, H., Tarus, I., Cheng, L., Veljkovic, M., Persem, N., & Lorich, L. (2021). Experiments and numerical simulation of wire and arc additive manufactured steel materials. *Structures*, 34, 1393–1402. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.055>.
12. Kyvelou, P., Slack, H., Mountanou, D. D., Wade, M. A., Britton, T. B., Buchanan, C., & Gardner, L. (2020). Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material. *Materials & Design*, 108675. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108675>.
13. Hadjipantelis N., Weber B., Buchanan C., Gardner L. (2022). Description of anisotropic material response of wire and arc additively manufactured thin-walled stainless steel elements. *Thin-Walled Structures*, 171, 108634. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108634>.
14. Gang, M., Xueming, H., Ye, H., Chen, S., Min W. (2020) Study on the microstructure optimization and mechanical properties of dissimilar TC4-304L arc-brazing joints, *Materials Science and Engineering: A*, 788. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139566>.
15. Yu, Z.S., Li, R.F., Zhou, F.M. et. al. (2004) Joint evolution and strengthening mechanisms in arc brazed galvanised steels with Cu97Si3 filler. *Materials Science and Technology*, 20(11), 1479-1483. <https://doi.org/10.1179/026708304225022133>.
16. Baby, J., Amirthalingam, M. (2020) Microstructural development during wire arc additive manufacturing of copper-based components. *Welding in the World*, 64, 395–405. <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00840-y>.
17. Yanhu, W., Xizhang, C., Sergey, K., Chuanchu, S., Arshad, N.S., Namrata, G. (2019) In-situ wire-feed additive manufacturing of Cu-Al alloy by addition of silicon. *Applied Surface Science*, 487, 1366–1375. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.068>.
18. Lahodzynskyi, I.M., Kvasnytskyi, V.V., Hryniuk, A.A. (2023). Osoblyvosti vykorystannia CMT ta Pulse tekhnologii pry duhovomu adytyvnomu vyhotovlenni prostorovykh vyrobiv. Zvariuvannia ta sporidneni tekhnologii: perspektyvy rozvytku [Features of using CMT and Pulse technologies in arc additive manufacturing of spatial products]. *Tezy dopovidei V Mizhnarodnoi naukovu-tekhnichnoi konferentsii – Welding and related technologies: prospects for development: theses add. V International science and technology conf.* (pp. 50–53). Donbass state engineering academy.
19. Prokhorenko, O., Hainutdinov, S., Prokhorenko, V., Pulka, C., Senchyshyn, V., (2022). Numerical simulation results of the kinetics of temperature and phase composition in a butt joint made from steel DC04 during a single-pass submerged arc welding. *Procedia Structural Integrity*, 36, 2022, 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.037>.
20. Grigorenko, G.M., Kostin, V.A., Zhukov, V.V. (2017). Modeling of metallurgical additive process of manufacture of 09G2S steel structures. *Electrometallurgy Today*, 2, 35–44. <https://doi.org/10.15407/sem2017.02.06>.
21. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Lahodzinkyi, I., Illiashenko, Y., Peleshenko, S., Voitenko, O. (2020). Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials. *IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, 02SAMA16-1–02SAMA16-5. <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>.
22. Spittel, Marlene & Spittel, Thilo. (2016). Flow stress and plasticity of CuSi3Mn. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14174-4_62.
23. Handbook of Comparative World Steel Standards. (2004). International Technical Information Institute.
24. Goldak, J.A., Akhlagi, M. (2005). *Computational Welding Mechanics*. Springer.
25. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Fox, D.D. (2014). The finite element method for solid and structural mechanics. Zienkiewicz–Elsevier.
26. Haelsig, A., Kusch, M., & Mayer, P. (2012). New Findings On The Efficiency Of Gas Shielded Arc Welding. *Welding in the World*, 56(11-12), 98–104. <https://doi.org/10.1007/BF03321400>.

Отримано 03.02.2024

Daria Prokhorenko¹, Ivan Lahodzynskyi²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: dariawelding@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2589-7056>

ResearcherID: J-4556-2017. **SCOPUS Author ID:** 57765152000

²Doctoral Student, Assistant of the Department of Welding
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: i.lahodzynskyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7986-9440>

ResearcherID: JZT-5376-2024. **SCOPUS Author ID:** 57221758864

NUMERICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE DURING ADDITIVE MIG WELDING WITH CuSi3Mn SILICON BRONZE

The article analyzes in detail the stress-strain state during additive manufacturing using silicon bronze CuSi3Mn1 (БpKM43-1), which is widely used in the machine-building industry for the manufacture of bushings, spring parts, and parts of chemical apparatus. The high cost of non-ferrous copper-based alloys makes it important to use Welding Arc Additive Manufacturing (WAAM) technologies. The processes of layer-by-layer surfacing of silicon bronzes lead to residual stresses at the tensile strength of the material, which can eventually provoke the development of critical defects in the form of cracks. Based on the simultaneous solution of the finite element method for the equations of heat balance and mechanics of a solid deformed body, the peculiarities of temperature distribution and parameters of the stress-strain state for the developed model of a triangular equilateral prism, which is additively generated from CuSi3Mn1 bronze, are determined. Verification of the experimental model with the calculated one was carried out by comparing the thermal cycles of surfacing. Based on the analysis of the results of numerical modeling, it was found that the nature of the temperature change and the magnitude of its decrease in the corresponding layer after the deposition of subsequent layers are the same and do not depend on the deposition trajectory, and the largest residual equivalent plastic deformations are formed in the first layer with a gradual decrease in the value in each subsequent deposited layer, which is associated with a decrease in the degree of volume of the VAT prism from the 1st to the 10th layer. The lower layers are characterized by a volumetric stress state due to the presence of rigid binders in the form of the substrate and the upper welded layers, which increases the probability of cracking in these layers during the cooling stage due to a decrease in the material's strength below $\sigma_B < 170$ MPa in the temperature range of 475-550 °C.

Keywords: WAAM; GMAW; stress-strain state; additive technologies; CuSi3Mn1; layer-by-layer surfacing.

Fig.: 14. Table: 3. References: 26.

Валерій Лаврінченко¹, Галина Ільницька², Володимир Солод³

¹доктор технічних наук, професор, завідувач відділу алмазно-абразивної та фізико-технічної обробки
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: lavrinen52@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2098-7992>, **Scopus Author ID:** [7003475456](https://orcid.org/0000-0003-2098-7992)

²кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач лабораторії технології дисперсних надтвердих матеріалів

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

E-mail: gil-ism@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5124-1646>, **Scopus Author ID:** [6507166095](https://orcid.org/0000-0001-5124-1646)

³кандидат технічних наук, доцент, декан механічного факультету

Дніпровський державний технічний університет МОН України (Кам'янське, Україна)

E-mail: v_solod@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7516-9535>, **Scopus Author ID:** [6603463079](https://orcid.org/0000-0002-7516-9535)

**СУЧАСНІ НАПРАЦЮВАННЯ В НАНЕСЕННІ МЕТАЛІЧНИХ ПОКРИТТІВ
НА ЗЕРНА ШЛІФПОРОШКІВ АЛМАЗІВ ДЛЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО
ІНСТРУМЕНТУ**

У статті подані сучасні матеріалознавчі напрацювання спрямовані на зміну властивостей алмазних зерен підвищеної міцності AC15–AC32 для підвищення їх ефективного застосування в шліфувальному інструменті. Авторами для цього застосовані металічні покриття на зернах. Наведені сучасні розробки з технологій нанесення металічних покриттів та вибору їхнього складу. Показана ефективність нанесення комбінованого Ni–Al покриття на алмазні зерна, а також застосування при цьому в покритті домішок нанопорошків вуглецевих трубок.

Ключові слова: металічні покриття; алмазні зерна; комбіноване покриття; шліфувальний інструмент.

Рис.: 4. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Розвиток інструментального виробництва зумовлює необхідність в ефективній обробці нових важкооброблюваних матеріалів. Пошук шляхів енергозбереження диктує потребу отримання композиційних покриттів на зернах алмазних шліфпорошків з новими властивостями. Раніше проведеними дослідженнями встановлено, що основними з факторів, які, наприклад, визначають їх алмазоутримання, є гранична хімічна взаємодія з елементами покриття при високотемпературному виготовленні інструментів на металічних зв'язках, а також дифузійна взаємодія на межі покриття-зв'язка. В алмазному інструменті на полімерних і металополімерних зв'язках хімічна взаємодія відбувається на межі метал покриття – полімер. При цьому, чим покриття є більш шорстким, тим більшою є площа поверхні зерна й ефективність цієї взаємодії.

Постановка проблеми. Одним зі шляхів підвищення зносостійкості алмазного інструменту є покращення алмазоутримання у зв'язці через металізацію алмазів різними комбінованими покриттями. Особливо це є актуальним саме для зерен алмазів підвищеної міцності (AC15–AC32).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Металічне покриття зерен алмазів є одним з важливих факторів впливу на зміну його властивостей та покращення утримання у зв'язуючому робочому шару шліфувального інструменту. Враховуючи, що цей напрямок активно розвивається, нами зосереджена увага саме на сучасних розробках в отриманні різних металічних покриттів на алмазах та їх властивостях.

У статті [1] запропоновано застосування покриття металічним припоєм на різних типах алмазних зерен для поліпшення утримання алмазних зерен в алмазних кругах на полімерній зв'язці. Були виготовлені алмазні круги на зв'язці зі смоли з алмазним зерном, покритим припоєм, і були випробувані круги при шліфуванні твердого сплаву. Пайка може успішно покрити більшу частину алмазних зерен шаром присадкового сплаву. Спостерігалися пори й випуклості розміром у декілька мікрометрів, а також утворення карбїду титану між покриттям і алмазною поверхнею (рис. 1). Показники в'язкості монокристалічних алмазних зерен з покриттям (RVD) знизилися лише незначно, але більш відчутно підвищилися для полікристалічних алмазних зерен з покриттям (PDGF1). Круг, який містив алмазні зерна PDGF1 продемонстрував найменше зусилля шліфування і найбільш високу продуктивність серед чотирьох оцінюваних кругів, тоді як круг з алмазними зернами RVD з покриттям мав найбільше зусилля шліфування і досить низький коефіцієнт шліфування [1].

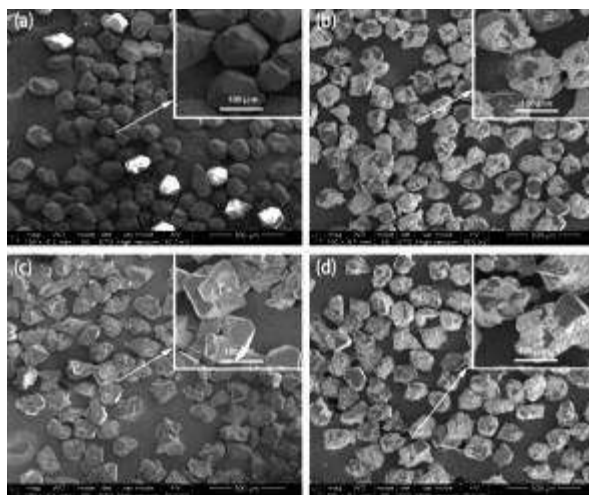


Рис. 1. Загальний вигляд алмазних порошків із покриттям RVD (a) та RVDF1 (b-d) [1]

Металічні вольфрамівмісні покриття наносилися на поверхню мікрочастин алмаза методом гарячого пресування із застосуванням WO_3 як джерела металу [2]. Покриття, сформовані на поверхні алмаза, реагували з порошком WO_3 при гарячому пресуванні за підвищених температур. Після обробки суміші при $850\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 15 хв на поверхні алмаза були зафіксовані WO_2 та $W_{18}O_{49}$. Після обробки при $950\text{ }^\circ\text{C}$ (15 хв) вольфрам був домінуючою фазою покриття. Обробка при $1150\text{ }^\circ\text{C}$ (15 хв) привела до утворення WC та W_2C фаз. У покритті, отриманому при цій температурі, металічний вольфрам був відсутнім. При формуванні покриття спостерігалася селективність осадження покриття по алмазних гранях. На грані $\{100\}$ алмаза покриття наносилося краще. Таке покриття формувалося шляхом утворення і злиття островків квадратної форми на гранях $\{100\}$ і трикутної форми на гранях $\{111\}$ алмаза [2].

У статті [3] для визначення особливостей реакції алмаза з різними видами металів і оксидів металів енергія активації реакції між алмазом і металами, а також між алмазом і оксидами металів, була розрахована з перших принципів. Для перехідних металів четвертого періоду Періодичної таблиці елементів, коли вони реагують з алмазом і утворюють відповідні карбіди металів. Порядок збільшення енергії активації для металів складає: Mn , Fe , V , Ti , Cr , Co , Ni , Zn та Cu . А коли алмаз реагує з MnO , FeO , CoO , NiO та CuO з утворенням металів і CO , розрахункова енергія активації за зменшенням складає: MnO , FeO , CoO , NiO та CuO . Так, встановлено, що NiO і CuO відновлюються алмазом до Ni і Cu , що саме і свідчить про те, що між алмазом і оксидами металів відбувається окислювально-відновлювальна реакція [3].

Але, алмазне покриття має низьку ударну в'язкість з-за своєї надтвердості, що може призвести до відшарування або руйнування покриття. У роботі [4] був запропонований новий метод хімічного осадження з парової фази, коли алмазне покриття з частинками CuO було нанесено на підкладку WC/Co . Для порівняння також було виготовлено чисте алмазне покриття. Морфологія поверхні засвідчила, що алмазне покриття може осаджуватися на підкладці з частинками CuO . Але частинки CuO можуть призводити до утворення аморфного вуглецю з високими полосами комбінаційного розсіяння (рис. 2). Випробування на втиснення засвідчили, що алмазне покриття з частинками CuO демонструє більш високі адгезійну міцність і стійкість до розтріскування, ніж покриття з чистого алмаза. Тобто вміст частинок CuO вплинув на тріщиностійкість алмазного покриття. Таким чином, диспергування частинок на поверхні підкладки можливо розглядати як потенційну технологію корегування алмазних зерен за рахунок включення вуглецевих фаз, що, у свою чергу, може підвищити тріщиностійкість алмазного покриття для задоволення промислових вимог.

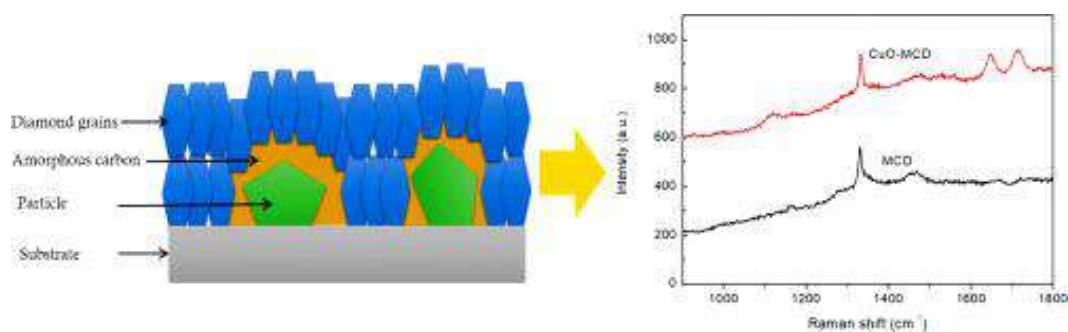


Рис. 2. Схема осажденного алмазного покрытия с частицами CuO та раманівські спектри чистого алмазного покриття (MCD) та покриття з частинками CuO (CuO-MCD). На рис.: diamond grains – алмазні зерна, amorphous carbon – аморфний вуглець, particle – частинки CuO, substrate – підкладка WC/Co, Raman shift – раманівський зсув, intensity – інтенсивність [4]

У статті [5] алмазні магнітні абразиви були виготовлені методом хімічного осадження композитів із застосуванням частинок заліза і мікрочастинок алмаза. Експериментальні результати засвідчили, що швидкість адсорбції частинок мікроалмаза на підкладці з порошку заліза можливо прогнозувати за встановленою формулою. Оптимальне співвідношення мікрочастинок алмаза і сплаву Ni-P в осаді може бути визначене при отриманні алмазних магнітних абразивів методом хімічного осадження композитів [5].

У статті [6] поданий інноваційний метод розпавлених солей для реактивної підготовки поверхнево-модифікованих алмазних частинок. Поверхнево-модифіковані композити на основі металів (міді або магнію), армовані алмазними частинками, були отримані методом електроіскрового плазмового спікання. Алмазні частинки з модифікованим градієнтом поверхні були отримані методом розплаву солей (рис. 3). Результати засвідчили, що товщина модифікованого шару на поверхні алмаза поступово підвищувалася зі збільшенням часу витримки. Композиційні матеріали на металічній основі з модифікованою поверхнею, армовані алмазними частинками, мають високу теплопровідність. При об'ємній частці алмаза у 35 % теплопровідність алмазно-мідних композитів досягала 602 Вт/(м·К), а теплопровідність алмазно-магнієвих -286 Вт/(м·К).

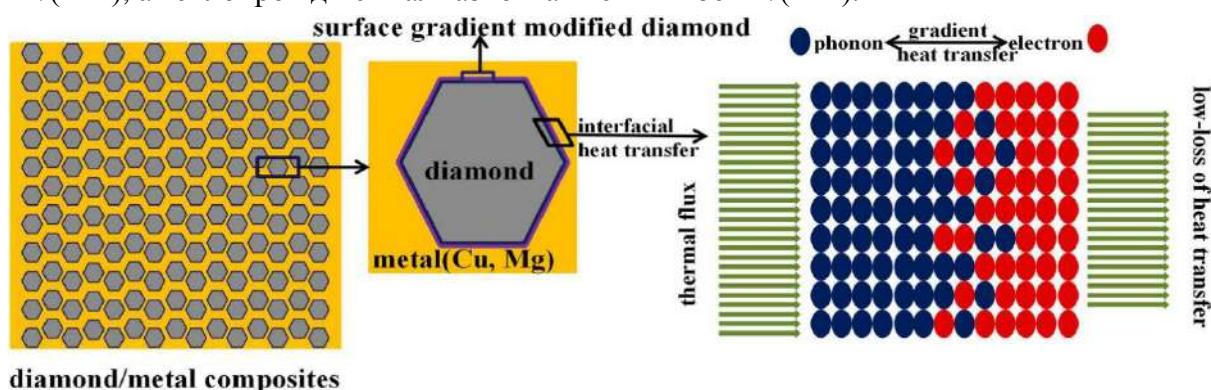


Рис. 3. Схема алмазно-металевого композиту з підвищеною теплопровідністю армованого частинками із модифікованою поверхнею алмазу. На рис.: diamond/metal composites – алмазно-металічні композити, surface gradient modified diamond – алмаз з модифікованим градієнтом поверхні, diamond – алмаз, metal (Cu, Mg) – метал (Cu, Mg), interfacial heat transfer – міжфазний теплообмін, thermal flux – тепловий потік, phonon-gradient heat transfer-electron – фонон-градієнтний теплообмін-електрон, low-loss of heat transfer – низькі втрати тепла [6]

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Наведений вище аналіз останніх досліджень і публікацій засвідчив, що нанесенню металічних покриттів на зерна алмазів приділяється значна увага. Разом з тим, відсутніми є дослідження особливостей нанесення покриття на алмази із різним вмістом домішок (магнітні та немагнітні алмази) та формування комбінованих покриттів із вмістом вуглецевих нанотрубок (ВНТ).

Метою статті є дослідження особливостей нанесення покриття на алмази з різним вмістом домішок (магнітні та немагнітні алмази) та формування комбінованих покриттів із вмістом вуглецевих нанотрубок на синтетичних алмазах марки АС20 зернистості 100/80 та виявлення властивостей таких покриттів і зносостійкості шліфувального інструменту з алмазними зернами з такими покриттями.

Виклад основного матеріалу. У нашому випадку розглядали особливості нанесення покриття для алмазів АС20 125/100, синтезованих в системі Ni–Mn. Усього було розглянуто 5 варіантів: вихідна суміш алмазів, виділені з неї магнітні алмази, виділені з неї немагнітні алмази. Потім додатково магнітні алмази були покриті окремо нікелем і алюмінієм. Аналогічно були покриті і немагнітні алмази. З цих алмазів були виготовлені шліфувальні круги типорозміру 12А2-45° 125×5×3×32 на металічній зв'язці М1-10 і визначені їх експлуатаційні показники при шліфуванні твердого сплаву ВК8 при різних продуктивностях обробки (табл. 1).

Таблиця 1 – Експлуатаційні характеристики шліфувальних кругів із застосуванням у них алмазних порошків марки АС20 зернистості 125/100 різних фракцій при шліфуванні твердого сплаву ВК8

Фракція порошку АС20	Продуктивність шліфування, мм ³ /хв.			
	50	100	200	400
<i>Відносні витрати алмазів в кругах, мг/г</i>				
Магнітна – покрита Al	0,46	0,97	2,04	3,38
Немагнітна – покрита Ni	0,49	1,50	1,78	4,03
Немагнітна – покрита Al	0,65	1,58	1,93	4,52
Вихідна непокрита	0,63	1,55	3,03	6,16
Магнітна – покрита Ni	0,72	2,02	3,06	6,31
<i>Шорсткість обробленої поверхні за параметром Ra, мкм</i>				
Вихідна непокрита	0,41	0,43	0,58	0,81
Магнітна – покрита Ni	0,52	0,48	0,58	0,77
Магнітна – покрита Al	0,43	0,67	0,79	0,92
Немагнітна – покрита Al	0,42	0,49	0,90	0,99
Немагнітна – покрита Ni	0,44	0,69	0,82	1,00

Аналіз табл. 1 свідчить, що покриття алмазів АС20 алюмінієм та нікелем дозволяє знизити знос кругів, хоча у випадку магнітних алмазів покриття нікелем навпаки, дещо підвищує знос кругів. Звернемо увагу на те, що в усіх випадках покриття алмазних зерен погіршує шорсткість обробленої поверхні, що відповідає висновкам досліджень, викладених в монографії [7].

Разом з тим, на наш погляд, слід звернути увагу на покриття алюмінієм. Воно не є таким технологічним, як покриття нікелем, але певний ефект дає, тому надалі нами була звернута увага на комбіновані покриття.

На першому етапі нами були розглянуті покриття на менш міцних алмазах АС6 125/100 нікелем і нікелем з алюмінієм. Металізовані методом хімічного поновлення Ni (25 % за масою) порошки алмаза АС6 були покриті методом обкатки в присутності спеціального зв'язуючого дрібнодисперсним порошком Al марки АСД крупністю – 40 мкм. Отримані металізовані шліфпорошки були використані при виготовленні кругів 12А2-45° 125×5×3×32 на зв'язці В2-08 якими надалі шліфували твердий сплав ВК6 при продуктивності 300 мм³/хв. без охолодження. Результати наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Експлуатаційні характеристики шліфувальних кругів із застосуванням в них алмазних порошків марки АС6 зернистості 125/100 з металізованими покриттями при шліфуванні твердого сплаву ВК6

Характеристика алмазних зерен	Експлуатаційні характеристики		
	Напруженість електростатичного поля шламу, кВ/м	Відносні витрати алмазів в кругах, мг/г	Шорсткість обробленої поверхні, Ra, мкм
Вихідна без покриття	– 0,5	4,58	0,34
Покриття – Ni	– 0,9	10,04	0,36
Покриття – Ni–Al	– 0,4	5,90	0,50

Аналіз табл. 2 засвідчив, що очікувано при нанесенні покриттів на алмази АС6 знос кругів і шорсткість обробленої поверхні зростає. Разом з тим комбіноване Ni–Al покриття є цікавим для подальших досліджень на більш міцних алмазах АС20, адже напруженість процесу шліфування за показником напруженості електростатичного поля шламу в процесі шліфування є навіть меншою за вихідні алмази без покриття.

Таблиця 3 – Експлуатаційні характеристики шліфувальних кругів із застосуванням у них алмазних порошків марки АС20 зернистості 100/80 з металізованими покриттями при шліфуванні твердого сплаву ВК8

Характеристика алмазних зерен	Експлуатаційні характеристики		
	Продуктивність шліфування, мм ³ /хв	Відносні витрати алмазів у кругах, мг/г	Шорсткість обробленої поверхні, Ra, мкм
Вихідна без покриття	200	6,8	0,51
	400	36,9	0,53
Покриття – Ni	200	5,7	0,47
	400	18,1	0,50
Покриття – Ni–Al	200	2,0	0,39
	400	17,8	0,45

Тому на другому етапі нами були розглянуті покриття на алмазах АС20 100/80 знову ж таки нікелем і нікелем з алюмінієм. Отримані металізовані шліфпорошки були використані при виготовленні кругів 12А2-45° 125×5×3×32 на зв'язці В2-08, якими надалі шліфували твердий сплав ВК8 при продуктивності 200 та 400 мм³/хв без охолодження. Результати наведені в табл. 3, з якої виходить, що за таких умов покриття на алмазах АС20 у полімерній зв'язці є позитивним у обох випадках. Хоча і в цьому випадку кращим є комбіноване покриття Ni–Al.

Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що у випадку застосування в шліфувальних кругах шліфпорошків алмазів марки АС20 бажано застосовувати при цьому металічне покриття зерен, причому таке покриття повинне бути із застосуванням алюмінію, або комбіноване – нікель-алюміній.

Як вже було вказано нами вище, одним зі шляхів підвищення зносостійкості алмазного шліфувального інструменту і збільшення алмазоутримання є металізація алмазів різними покриттями. Особливо це є актуальним для алмазів підвищеної міцності (АС15–АС32), тому надалі нами були досліджені металізовані композиційні покриття с добавками нанопорошків вуглецевих нанотрубок (ВНТ) на порошках алмаза марки АС20 зернистістю 100/80 і їх вплив на їх експлуатаційні показники в кругах. Металізовані методом хімічного відновлення Ni (25 % за масою) порошки алмаза були покриті методом обкатки у присутності спеціального зв'язуючого дрібнодисперсним порошком Al марки АСД крупністю –40 мкм. Добавки порошків вуглецевих нанотрубок не перевищували 2 % за масою. Висушені зразки спікали у печі на повітрі при температурі 850 °С. Степінь металізації алмазів з композиційним покриттям складала 70–75 % за масою. Фізико-хімічні

характеристики досліджували за допомогою мас-спектрометра МІ 1201 у температурному інтервалі 20–1000 °С у повітрі. Електронно-мікроскопічні дослідження здійснювали на електронному мікроскопі ZEISS ULTRASS.

За допомогою електронно-мікроскопічного аналізу досліджували структуру композиційних покриттів металізованих алмазів. Нижче поданий загальний вигляд алмазів марки АС20 100/80, металізованих композиційним покриттям Ni-Al з добавками нанопорошків ВНТ (рис. 4).

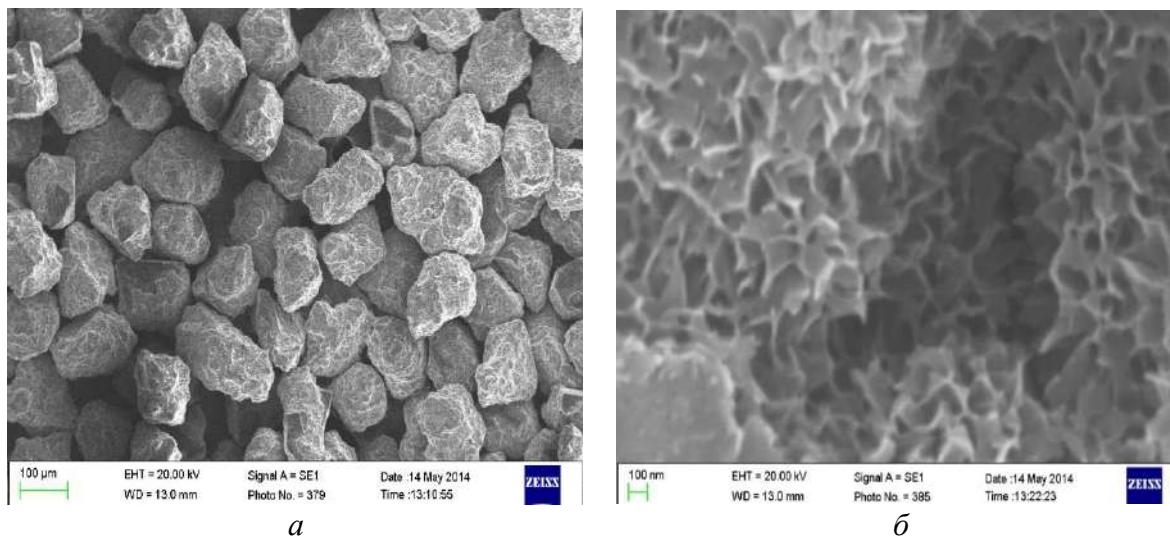


Рис. 4. Електронно-мікроскопічне зображення алмазів марки АС20 100/80, металізованих композиційним покриттям: Ni-Al з добавками ВНТ: а – загальний вигляд металізованого порошку; б – структура поверхні покриття

Як виходить з рис. 4 на зернах алмаза, металізованих композиційним покриттям Ni-Al з добавками ВНТ, сформована високопориста структура. Причому при доданні ВНТ у структурі покриття проглядається скелетна структура вуглецевих нанотрубок (б). Для отримання інформації про стан поверхні шліфпорошків марки АС20 зернистості 100/80 вихідних і металізованих Ni композиційним покриттям Ni-Al з добавками ВНТ були зняті термодесорбційні спектри. В результаті виконаних досліджень встановили, що поверхні усіх зразків металізованих алмазів повністю покриті великою кількістю ОН-груп, які десорбуючись з поверхні алмазі, створюють молекули води. Присутність води в порошках алмаза тісно пов'язана з їх питомою площею поверхні. На вихідному зразку (без покриття) фіксується найменший вміст води у зразку і менша питома площа поверхні зерен алмазу. Встановлено, що додання до металізованих Ni і композиційних покриттів Ni-Al добавок ВНТ сприяє утворенню більш розвиненої поверхні алмазних зерен, про що свідчить найбільша наявність води у порівнянні з вихідними порошками.

Порошки алмаза марки АС20 зернистості 100/80 вихідні, металізовані Ni та Ni-Al з добавками ВНТ були використані для виготовлення експериментальних шліфувальних кругів: 1. 12А2-45° 100х5х3х32 – АС20 100/80 В2-08-100 вихідний. 2. 12А2-45° 100х5х3х32 – АС20 100/80 В2-08-100 Ni (26,6 %) + ВНТ. 3. 12А2-45° 100х5х3х32 – АС20 100/80 В2-08-100 Ni (26,6 %)+Al (30,7 %) + ВНТ. Випробування проводилися на верстаті 3В642 при шліфуванні зразків з твердого сплаву ВК6 розмірами 7×15×60 мм при продуктивності шліфування 200 та 400 мм³/хв. Результати випробувань наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Експлуатаційні характеристики шліфувальних кругів із застосуванням в них алмазних порошків марки AC20 зернистості 100/80 з металізованими покриттями із доданням ВНТ при шліфуванні твердого сплаву ВК8

Покриття зерен алмазів	Продуктивність обробки, мм ³ /хв.			
	200	400	200	400
	Відносні витрати алмазів у кругах, мг/г		Шорсткість обробленої поверхні, Ra, мкм	
Ni	29,2	47,6	0,42	0,66
Ni+ВНТ	10,0	30,9	0,41	0,45
Ni-Al	23,4	57,5	0,45	0,59
Ni-Al+ВНТ	7,5	21,1	0,53	0,75

Як свідчить аналіз табл. 4, відносні витрати алмазів із покриттями металізованими Ni та Ni-Al з добавками ВНТ в шліфувальних кругах при шліфуванні твердого сплаву є істотно нижчими у порівнянні з кругами з вихідними алмазними порошками з покриттям без ВНТ. При цьому, даний ефект підвищення зносостійкості кругів є більш відчутним на менших продуктивностях обробки, а з підвищенням продуктивності він дещо знижується, але залишається достатньо відчутним. Так, навіть для 400 мм³/хв підвищення зносостійкості кругів становить 1,5–2,7 раза. Найкращим є покриття Ni-Al+ВНТ. По шорсткості обробленої поверхні навпаки дане покриття є гіршим, оскільки шорсткість стає відчутно вищою. Тобто при підвищених вимогах до шорсткості обробленої поверхні більш прийнятним є застосування в шліфувальних кругах покриття зерен AC20 – Ni+ВНТ.

Висновки. Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що у випадку застосування в шліфувальних кругах шліфпорошків алмазів марки AC20 бажано застосовувати при цьому металічне покриття зерен, причому таке покриття повинне бути із застосуванням алюмінію.

Встановлено, що на зернах алмаза, металізованих композиційним покриттям Ni-Al з добавками вуглецевих нанотрубок, формується високопориста скелетна структура. Показано, що поверхні всіх зразків металізованих алмазів покриті великою кількістю ОН-груп, які десорбуючись з поверхні алмазі, створюють молекули води. Присутність води в порошках алмаза тісно пов'язана з їх питомою площею поверхні. На вихідному зразку без покриття фіксується найменший вміст води у зразку й менша питома площа поверхні зерен алмазу. Введення до складу металізованих Ni і композиційних покриттів Ni-Al, добавок вуглецевих нанотрубок сприяє утворенню більш розвиненої поверхні, про що свідчить найбільша наявність води у порівнянні з вихідними порошками.

Встановлено, що відносні витрати алмазів в кругах із алмазами металізованими Ni та Ni-Al з добавками ВНТ при шліфуванні твердого сплаву є істотно нижчими у порівнянні з кругами з вихідними алмазними порошками з покриттям без ВНТ. При цьому, даний ефект підвищення зносостійкості кругів є більш відчутним на менших продуктивностях обробки, а з підвищенням продуктивності він дещо знижується, але залишається достатньо відчутним і становить 1,5–2,7 раза. Найкращим є покриття Ni-Al+ВНТ. При підвищених вимогах до шорсткості обробленої поверхні більш прийнятним є застосування в шліфувальних кругах покриття зерен AC20 – Ni+ВНТ.

Список використаних джерел

1. Preparation and performance of resin-bonded grinding wheel with braze-coated diamond grits / Ming-cong Li, Feng-lin Zhang, Yu-mei Zhou, Wei-xiong Li, Shixiong Wu, Shanghua Wu // *Diamond and Related Materials*. – 2020. – Vol. 101. – January. – Article 107619.
2. Morphological features and phase composition of W-containing coatings formed on diamond via its interaction with WO₃ / A. V. Ukhina, D. V. Dudina, B. B. Bokhonov, D. V. Savintseva, D. A. Samoshkin, S. V. Stankus. // *Diamond and Related Materials*. – 2022. – Vol. 123. – Article 108876.
3. Exploring the activation energy of diamond reacting with metals and metal oxides by first-principle calculation / Ao Deng, Jing Lu, Dongxu Li, Yanhui Wang // *Diamond and Related Materials*. – 2021. – Vol. 118. – Article 108522.

4. Growth and characterization of chemical vapor deposition diamond coating incorporated amorphous carbon with high Raman bands induced by CuO particles / Naichao Chen, Fasong Ju, Fan Zhou, Shuai Chen, Kun Wei, Ping He // *Diamond and Related Materials*. – 2021. – Vol. 116. – Article 108387.

5. Adsorption and deposition of micro diamond particles in preparing diamond magnetic abrasives by electroless composite plating / Bin Yang, Wenzhuang Lu, Wei Feng, Xu Yang, Dunwen Zuo // *Diamond and Related Materials*. – 2017. – Vol. 73. – P. 137-142.

6. Study on surface modification of diamond particles and thermal conductivity properties of their reinforced metal-based (Cu or Mg) composites / Congxu Zhu, Can Cui, Xiwang Wu, Bowen Zhang, Dong Yang, Hongxiao Zhao, Zhi Zheng // *Diamond and Related Materials*. – 2020. – Vol. 108. – October. – Article 107998.

7. Lavrinenko, V. Grinding wheels of superhard materials for diamond-abrasive processing: new in the famous / V. Lavrinenko. – Kyiv : Akademperiodyka, 2019. – 190 p.

References

1. Ming-cong Li, Feng-lin Zhang, Yu-mei Zhou, Wei-xiong Li, Shixiong Wu, Shanghua Wu. (2020). Preparation and performance of resin-bonded grinding wheel with braze-coated diamond grits. *Diamond and Related Materials*, 101, 107619.

2. A. V. Ukhina, D. V. Dudina, B. B. Bokhonov, D. V. Savintseva, D. A. Samoshkin, S. V. Stankus. (2022). Morphological features and phase composition of W-containing coatings formed on diamond via its interaction with WO₃. *Diamond and Related Materials*, 123, 108876.

3. Ao Deng, Jing Lu, Dongxu Li, Yanhui Wang. (2021). Exploring the activation energy of diamond reacting with metals and metal oxides by first-principle calculation. *Diamond and Related Materials*, 118, 108522.

4. Naichao Chen, Fasong Ju, Fan Zhou, Shuai Chen, Kun Wei, Ping He. (2021). Growth and characterization of chemical vapor deposition diamond coating incorporated amorphous carbon with high Raman bands induced by CuO particles, *Diamond and Related Materials*, 116, 108387.

5. Bin Yang, Wenzhuang Lu, Wei Feng, Xu Yang, Dunwen Zuo. (2017). Adsorption and deposition of micro diamond particles in preparing diamond magnetic abrasives by electroless composite plating, *Diamond and Related Materials*, 73, 137-142.

6. Congxu Zhu, Can Cui, Xiwang Wu, Bowen Zhang, Dong Yang, Hongxiao Zhao, Zhi Zheng. (2020). Study on surface modification of diamond particles and thermal conductivity properties of their reinforced metal-based (Cu or Mg) composites. *Diamond and Related Materials*, 108, 107998.

7. Lavrinenko, V. (2019). *Grinding wheels of superhard materials for diamond-abrasive processing: new in the famous*. Akademperiodyka.

Отримано 22.03.2024

UDC 621.762

Valerii Lavrinenko¹, Galyna Ilynska², Volodymyr Solod³

¹Doctor of Science, Professor, Head of Department diamond-abrasive and physical-technical machining.

Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: lavrinen52@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2098-7992>. **Scopus Author ID:** 7003475456

²PhD in Technical Sciences, Senior Research, Head of the laboratory technologies of dispersed superhard materials

Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: gil-ism@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5124-1646>. **Scopus Author ID:** 6507166095

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering

Dniprovsk State Technical University MES of Ukraine (Kamianske, Ukraine)

E-mail: v_solod@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7516-9535>. **Scopus Author ID:** 6603463079

MODERN DEVELOPMENTS IN THE APPLICATION OF METALLIC COATINGS ON THE GRAINS OF DIAMOND GRINDING POWDER FOR GRINDING TOOLS

The development of tool production, the need for effective processing of new difficult-to-process materials, and the search for ways to save energy dictate the need to obtain composite coatings on the grains of diamond grinding powders with new properties and their increased diamond content.

One of the ways to increase the wear resistance of a diamond tool is to improve the retention of diamonds in the bond through the metallization of diamonds with various combined coatings. This is especially relevant for high-strength diamond grains (AC15–AC32).

The above analysis of recent research and publications has shown that considerable attention is paid to the application of metallic coatings on diamond grains. At the same time, there are no studies of the features of coating on diamonds with different content of impurities (magnetic and non-magnetic diamonds) and the formation of combined coatings with the content of carbon nanotubes.

The purpose of the article is to study the features of coating on diamonds with different content of impurities (magnetic and non-magnetic diamonds) and the formation of combined coatings with the content of carbon nanotubes on synthetic diamonds of the AS20 grade of 100/80 grain size and to identify the properties of such coatings and the wear resistance of a grinding tool with diamond grains with such coatings.

The article presents modern material science developments aimed at changing the properties of high-strength diamond grains AC15–AC32 to increase their effective use in grinding tools. The authors used metal coatings on grains for this. The modern developments in the technology of applying metal coatings and choosing their composition are presented. The effectiveness of applying a combined Ni–Al coating on diamond grains is shown, as well as the use of carbon nanotubes in the coating.

It was established that the relative costs of diamonds in wheels with Ni and Ni-Al metallized diamonds with carbon nanotube additives when grinding a hard alloy are significantly lower compared to wheels with original diamond powders coated without carbon nanotubes. The best coating is Ni–Al+carbon nanotubes. The presented materials can be used for a reasoned choice of the metallized coating of diamond grains in order to increase the efficiency of the use of diamond grinding wheels in industry.

Key words: metal coatings, carbon nanotubes, diamond grains, combined coating, grinding tool.

Fig.: 4. **References:** 7.

Тетяна Макруха¹, Олександр Пузирьов²¹кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки

Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті (Кропивницький, Україна)

E-mail: tmakruha@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8841-1688>. **Researcher ID:** [57222660526](https://orcid.org/57222660526)²кандидат технічних наук, завідувач кафедри прикладної механіки

Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті (Кропивницький, Україна)

E-mail: olexandreti@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2158-3714>**ОГЛЯД СУЧАСНИХ РОБОТІВ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ**

Стаття є оглядово-інформаційною. У цьому дослідженні розглянуто основні характеристики передових роботів, оснащених штучним інтелектом, які застосовуються у різних сферах техніки та побуту. Особливий акцент робиться на використанні таких роботів у соціальній сфері, агропромисловій галузі та автоматизації процесів. Розглянуті технологічні комплекси не тільки впроваджуються у виробництво, але й мають значний вплив на покращення якості життя та оптимізацію виробничих процесів.

У соціальній сфері висвітлено роботи, спрямовані на надання підтримки та допомоги особам з обмеженими можливостями, а також для допомоги старшому поколінню. У галузі сільськогосподарства розглянуто роботи, спрямовані на автоматизацію сільськогосподарських процесів, що сприяє підвищенню продуктивності та раціональному використанню ресурсів. На додаток, розглянуто роль роботів у виробничому середовищі, де автоматизовані системи сприяють підвищенню ефективності та точності виробничих операцій.

Ключові слова: робототехніка; штучний інтелект; роботи зі штучним інтелектом.

Рис.: 7. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Швидкий прогрес технологій перетворив концепцію штучного інтелекту зі сфери фантастики в щоденну реальність. Використання новітніх цифрових технологій, зокрема штучного інтелекту, зумовлює створення інноваційних продуктів і послуг, відкриває нові можливості для зростання економіки та суспільства [1]. Розвиток штучного інтелекту впливає майже на всі сфери життя людини, особливо в галузі механічної інженерії, зокрема, на розвиток робототехнічних комплексів. Завдяки цим якостям інтелектуальний робототехнічний комплекс може вирішувати найскладніші та різноманітні технологічні задачі, а також легко перебудовуватися з рішення одного класу задач на інший. Таким чином, система управління робототехнічних комплексів, наділена елементами штучного інтелекту, є універсальним засобом вирішення широкого кола технологічних завдань. Вона дозволяє автоматизувати технологічні операції інтелектуального характеру [2].

Постановка проблеми. Швидкий розвиток сфери робототехніки ставить перед вищою освітою завдання перегляду методів навчання для майбутніх фахівців. Таким чином, важливо постійно адаптувати та модернізувати зміст предметів, що викладаються, зокрема, у напрямку промислової робототехніки. Підхід до передачі знань повинен бути комплексним, враховуючи взаємозв'язки між різними етапами проєктування та виробництва. Інформація, представлена в цій статті, призначена для огляду та методичної підтримки, спрямованої на систематизацію та узагальнення матеріалу з предмета «Промислова робототехніка» для майбутніх фахівців зі спеціальності 131 "Прикладна механіка".

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання розвитку штучного інтелекту – один із найбільш прогресивних напрямків технологій у XXI столітті. У контексті стрімкого поширення тенденцій глобалізації, впровадження новинок у сфері технологій, відкритого діалогу між представниками наукової еліти, що стосується стратегічного планування в інформаційній сфері, питання обговорення проблематики використання штучного інтелекту є достатньо актуальним та виправданим [3].

Концепції штучного інтелекту в сучасному уявленні виникли у 1940-1950 роках. Загальні напрямки розвитку були визначені Уорреном Мак-Каллоком і Уолтером Піттсом, які базувались на 3 джерелах: знаннях про структуру мозку, фізіологію, роботу нейронів;

аналізу логіки висловлювань, що базувався на роботах Рассела та Уайтхеда; теорії обчислень Тюрінга. Згодом сам Тюрінг сформував загальне бачення та фундаментальні принципи штучного інтелекту у книзі «Обчислювальні машини та розум» [5].

Поняття штучного інтелекту було сформульовано у другій половині ХХ століття. Одне з перших визначень штучного інтелекту належить Джону МакКарті і було оприлюднене на конференції в Коледжі Дармуту (Нью Хемпшир) у 1956 р. як: «Спосіб примусити обчислювальну машину думати, як людина». Розуміння поняття інтелекту як придатності системи до навчання приводить науковців до ще одного з визначень штучного інтелекту: «здатність автоматизованих систем здобувати, адаптувати, модифікувати та поповнювати знання з метою пошуку розв'язання задач, формалізація яких ускладнена» [5; 6].

Відповідно до Плану заходів з реалізації Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні на 2021-2024 роки, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 12 травня 2021 року № 438-р [7; 8] визначено напрями та механізми реалізації основних базових завдань розвитку технологій штучного інтелекту в Україні, зокрема важливим є забезпечення використання технологій штучного інтелекту в оборонних системах, сфері охорони здоров'я, правосуддя, а також для проведення аналізу ефективності системи публічного управління.

До переваг використання штучного інтелекту можна віднести можливість аналізу та обробки великого обсягу даних у всіх сферах промисловості, економіки тощо; економія часу та коштів; зниження рівня ризиків для працівників на небезпечних виробництвах; скорочення помилок через людський фактор тощо.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У зв'язку з цим у цьому дослідженні фокус поширюється на проблематику, пов'язану із впровадженням роботів зі штучним інтелектом, охоплюючи не лише технічні аспекти, але й ширший вплив цих технологій на різні сфери науки та техніки. Важливість дослідження проявляється в урахуванні не тільки позитивних аспектів використання роботів зі штучним інтелектом, але й потенційних викликів та проблем, які можуть виникнути у процесі їхнього застосування. Вивчення можливостей та обмежень роботів зі штучним інтелектом необхідне для розуміння їхнього впливу на суспільство, формування етичних норм та розробки стратегій управління цими технологіями. Це дослідження сприяє більш глибокому розумінню потенціалу використання роботів зі штучним інтелектом.

Метою роботи є огляд наявних сучасних розробок у робототехніці, які мають штучний інтелект, та їх впровадження в різні галузі життя людини для формулювання перспектив подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу. Уже складно уявити наше щоденне життя без побутових роботів, таких як роботи-прибиральники чи роботи-помічники, які стали необхідною частиною нашого повсякдення. Проте ключовою складовою технологічного прогресу є промислові роботи, що сприяють оптимізації виробництва та поліпшенню умов праці. Сучасні комплекси робототехніки зі штучним інтелектом активно використовуються в різноманітних секторах та галузях, сприяючи підвищенню ефективності та розвитку. Розглянемо декілька прикладів.

5 липня 2023 року на конференції від Організації Об'єднаних Націй у м. Женева (Швейцарія) було представлено роботів-гуманоїдів, які мають штучний інтелект. Так, одним із представлених роботів є соціальний робот Nadine (рис. 1), який вже використовується для мешканців будинків престарілих, адже робот може імітувати міміку та запам'ятовує людей через їх навички та звички [9].



Рис. 1. Соціальний робот Nadine [9]

Також роботів-гуманоїдів активно використовують в авіакосмічній галузі. Так, у 2024 році для виконання космічної місії Gaganyaan Індійська організація космічних досліджень збирається відправити робота-космонавта Vyommitra для дослідження впливу невагомості та радіації в космічному середовищі на стан людини (рис. 2) [10].



Рис. 2. Робот-космонавт Vyommitra [10]

У Німеччині на виробництві Zauberzeug розроблено агропромислового робота зі штучним інтелектом Zauberzeug Field Friend, який використовується для землеробства (рис. 3). Робот Field Friend призначений для механічної боротьби з бур'янами, мета якого значно скоротити ручну роботу в біологічному землеробстві [11].

Ще одним роботом в агропромисловості є Verdi (рис. 4) від компанії Electric Sheep Robotics Inc., який має власний штучний інтелект та програмне забезпечення. Даний робот займається ландшафтним дизайном, а саме обрізкою дерев, косінням газону, самостійно створюючи карту та межі роботи. «Verdie надихається такими роботами, як WALL-E, R2-D2 і BB-8 – помірно складними, негуманоїдними агентами, які виконують значущу роботу за допомогою втіленого штучного інтелекту», – заявила компанія під час презентації робота 28 лютого 2024 року [12].



Рис. 3. Робот Field Friend [11]



Рис. 4. Робот Verdi [12]

18 вересня 2023 року у штаті Орегон (США) відкрито фабрику RoboFab для створення роботів-гуманоїдів зі штучним інтелектом Digit, які створені, щоб допомагати Amazon та іншим гігантським компаніям у небезпечних роботах – транспортуванні, підйомі й переміщенні вантажів (рис. 5) [13].



Рис. 5. Робот-гуманоїд Digit [13]

У січні 2023 року компанія Amazon презентувала робота-маніпулятора Sparrow (рис. 6), який використовує штучний інтелект для роботи з пакунками на складах. «Sparrow візьме на себе повторювані завдання, дозволяючи нашим співробітникам зосередити свій час і енергію на інших справах, а також підвищити їхню безпеку. Водночас Sparrow допоможе нам підвищити ефективність, автоматизувавши важливу частину нашого процесу виконання замовлень, щоб ми могли продовжувати доставку для клієнтів», – заявили в компанії.



Рис. 6. Робот-маніпулятор Sparrow [14]

На початку 2024 року компанії Samsung Electronics та LG розробили роботів-помічників Ballie (рис. 7, а) та Saetta (рис. 7, б) відповідно, які мають штучний інтелект. Презентація обох роботів відбулася на виставці у Лас-Вегасі 9...12 січня 2024 року. Ці роботи-помічники створення для будь-якої допомоги по дому, наприклад, поливання квітів, регулювання температури, нагляд за домашніми тваринами. Також роботи за допомогою штучного інтелекту здатні аналізувати міміку та настрої людини, тому може, зокрема, увімкнути музику чи відео з тренуванням [15; 16].



а



б

Рис. 7. Роботи-помічники:

а – Ballie від Samsung Electronics; б – Saetta від LG [15; 16]

Висновки. Розглянуто можливості використання роботів зі штучним інтелектом у різних галузях, зокрема, промисловості, аграрній, соціальній та побутовій сферах. Виявлено, що ці технології можуть ефективно автоматизувати різні аспекти повсякденного життя людини. Висвітлено, що штучний інтелект та робототехніка не лише сприяють збільшенню продуктивності, але й допомагають у створенні безпечніших умов праці завдяки виконанню роботами функцій із підвищеним ризиком. Показано, що штучний інтелект та робототехніка можуть поліпшити та зробити більш безпечною професійну діяльність, за рахунок виконання ризикових функцій, що зменшить число виробничих травм та захворювань.

Список використаних джерел

1. Тюря, Ю. І. Аналіз філософсько-правових підходів до визначення поняття “Штучний інтелект” / Ю. І. Тюря // Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. – 2022. – № 56. – С. 54-58. DOI: <https://doi.org/10.32841/2307-1745.2022.56.12>.

2. Терещенко, С. С. Роботизовані системи штучного інтелекту [Електронний ресурс] / С. С. Терещенко, А. В. Татаров // Наукові записки. – 2012. – № 12, Ч. 1. – С. 9-11. – Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/4648>.

3. Батарєєв, В. В. Методи та системи штучного інтелекту / В. В. Батарєєв // Вісник Хмельницького національного університету. – 2021. – № 1 (293). – С. 17-21. DOI 10.31891/2307-5732-2021-293-1-17-21.

4. Дубчак, А. О. Напрямки використання штучного інтелекту в сучасних умовах [Електронний ресурс] / А. О. Дубчак, Я. В. Литвиненко // Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України : матеріали Міжнар. наук. конф. – Тернопіль, 2020. – С. 64-65. – Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/343949598.pdf>.

5. McCarthy, J. Dartmouth AI Project Proposal [Electronic resource] / J. McCarthy. – 1955. – Access mode: <http://www.formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>.

6. Яненкова, І. Г. Переваги та ризики використання штучного інтелекту в Україні та світі / І. Г. Яненкова // Ефективна економіка. – 2020. – № 4. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.4.19>.

7. Про затвердження плану заходів з реалізації Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні на 2021-2024 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 12. 05. 2021 р. № 438-р. // Офіційний вісник України. – 2021. – № 40. – Ст. 2417. – С. 171.

8. Карпенко, О. В. Застосування технологій штучного інтелекту у реформуванні сфери охорони здоров'я / О. В. Карпенко, Ю. В. Карпенко, Є. А. Кульгінський // Державне управління: удосконалення та розвиток. – 2021. – № 11. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2156-2021.11.2>.

9. Nadine social robot [Electronic resource]. – Access mode: <https://nadineforgood.ch>.

10. Goswami, D. Gaganyaan mission: Meet Vyommitra, the talking human robot that Isro will send to space [Electronic resource] / Dev Goswami // India today. – 2020. – Jan. 22. – Access mode: <https://www.indiatoday.in/science/story/gaganyaan-vyommitra-talking-humanoid-isro-space-1639077-2020-01-22>.

11. Zauberzeug [Electronic resource]. – Access mode: <https://zauberzeug.com>.

12. Electric Sheep Verdie robot uses large world models for autonomous landscaping // The Robot Report. – 2024. – Feb 28. – Access mode: <https://www.therobotreport.com/meet-electric-sheep-latest-autonomous-lawn-robot-verdie>.

13. Agility Robotics [Electronic resource]. – Access mode: <https://agilityrobotics.com/>

14. “Амазон презентував робота зі штучним інтелектом “Sparrow” [Електронний ресурс] // Укрінформ. – 2022. – 12 листоп. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/3612805-amazon-prezentuvala-robota-zi-stuchnim-intelektom-sparrow.html>.

15. A Day in the Life With Ballie: An AI Companion Robot for the Home [Electronic resource] // Samsung News. – 2024. – Jan. 9. – Access mode: <https://news.samsung.com/global/video-ces-2024-a-day-in-the-life-with-ballie-an-ai-companion-robot-for-the-home>.

16. LG Ushers in ‘Zero Labor Home’ With Its Smart Home AI Agent at CES 2024 // LG News. – 2023. – Dec. 27. – Access mode: <https://www.lgnewsroom.com/2023/12/lg-ushers-in-zero-labor-home-with-its-smart-home-ai-agent-at-ces-2024/>.

References

1. Tiuria, Yu. (2022). Analiz filozofsko-pravovykh pidkhodiv do vyznachennia poniattia “Shtuchnyi intelekt” [Analysis of philosophical and legal approaches to the definition of the concept of «artificial intelligence»]. *Naukovyi visnyk Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu – Scientific Bulletin of the International Humanitarian University*, 56, 54–58. <https://doi.org/10.32841/2307-1745.2022.56.12>.

2. Tereshchenko, S.S., & Tatarov, A.V. (2012). Robotyzovani systemy shtuchnoho intelektu [Robotic systems of artificial intelligence]. *Naukovi zapysky – Scientific notes*, 12(1), 9-11. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/4648>.

3. Batareyev, V. (2021). Metody ta systemy shtuchnoho intelektu [Methods and systems of artificial intelligence]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*, 1(293), 17-21. DOI 10.31891/2307-5732-2021-293-1-17-21.

4. Dubchak, A. (2020). Napriamky vykorystannia shtuchnoho intelektu v suchasnykh umovakh [Directions of use artificial intelligence in modern conditions]. *Ivan Puliui: zhyttia v imia nauky ta Ukrainy: materialy Mizhnar. nauk. konf. – Proceedings of the International Scientific Conference "Ivan Pului: Life in the Name of Science and Ukraine"*. (pp. 64–65). <https://core.ac.uk/download/343949598.pdf>.
5. McCarthy, J. (1955). *Dartmouth AI Project Proposal*. <http://www.formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>.
6. Yanenkova, I. (2020). Perevahy ta ryzyky vykorystannia shtuchnoho intelektu v Ukraini ta sviti [Advantages and risks of artificial intelligence using in Ukraine and in the world]. *Efektivna ekonomika – Efficient economy*, 4. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.4.19>.
7. Pro zatverdzhennia planu zakhodiv z realizatsii Kontseptsii rozvytku shtuchnoho intelektu v Ukraini na 2021-2024 roky [On the approval of the plan of measures for the implementation of the Concept of the development of artificial intelligence in Ukraine], Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated May 12, 2021 № 438-p. *Official Gazette of Ukraine*, 2417.
8. Karpenko, O., Karpenko, Y. & Kulhinskyi, Ye. (2021). Zastosuvannia tekhnolohii shtuchnoho intelektu u reformuvanni sfery okhorony zdorovia [Application of artificial intelligence technologies in healthcare reform]. *Derzhavne upravlinnia: udoskonalennia ta rozvytok – Public administration: improvement and development*, 11. <https://doi.org/10.32702/2307-2156-2021.11.2>.
9. Official site Nadine social robot. <https://nadineforgood.ch/>
10. Dev Goswami. (2020, Jan. 22). Gaganyaan mission: Meet Vyommitra, the talking human robot that Isro will send to space. *India today*. <https://www.indiatoday.in/science/story/gaganyaan-vyommitra-talking-humanoid-isro-space-1639077-2020-01-22>.
11. Official site Zaubergeug. <https://zauberzeug.com/>
12. Electric Sheep Verdie robot uses large world models for autonomous landscaping. (2024, Feb 28). *The Robot Report*. <https://www.therobotreport.com/meet-electric-sheep-latest-autonomous-lawn-robot-verdie>.
13. Official site Agility Robotics. <https://agilityrobotics.com>.
14. Amazon presented Sparrow, a robot with artificial intelligence. (2022, Nov. 12). *Ukrinform*. <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/3612805-amazon-presentovala-robota-zi-stucnim-intel-ektom-sparrow.html>.
15. A Day in the Life With Ballie: An AI Companion Robot for the Home (2024, Jan. 9). *Samsung News*. <https://news.samsung.com/global/video-ces-2024-a-day-in-the-life-with-ballie-an-ai-companion-robot-for-the-home>.
16. LG Ushers in 'Zero Labor Home' With Its Smart Home AI Agent at CES 2024. (2023, Dec. 27). *LG News*. <https://www.lgnewsroom.com/2023/12/lg-ushers-in-zero-labor-home-with-its-smart-home-ai-agent-at-ces-2024>.

Отримано 25.02.2024

UDC 004.896:007.52

Tetiana Makrukha¹, Olexandr Puzyrov²

¹ PhD, associate professor Department of Applied Mechanics

Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)

E-mail: tmakruha@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8841-1688>. **Researcher ID:** [57222660526](https://orcid.org/57222660526)

² PhD, Head of Department of Applied Mechanics

Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)

E-mail: olexandreti@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2158-3714>

REVIEW OF MODERN ROBOTS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The rapid development of technologies in the field of artificial intelligence and robotics calls for a systematic analysis of their impact on modern society. The growing role of robots with artificial intelligence in various sectors of industry and economy calls into question not only traditional methods of production, but also social aspects of their usage.

Statement of the problem: today, the technologies of robotics and artificial intelligence are developing very quickly, which makes it possible to introduce advanced robots with artificial intelligence in various industries, since this is happening on the background of rapidly changing labor markets, increasing requirements for the efficiency and competitiveness of enterprises. Studying the impact of these technologies on industry and society is necessary for the sustainable development of various industries, in particular, mechanical engineering, which will help to understand the advantages and challenges associated with these technologies, as well as to contribute to the development of strategies for the usage of such robots and the regulation of their implementation.

The purpose of this study is to review existing modern developments in robotics, which have artificial intelligence, and their implementation in various areas of human life in order to formulate prospects for further research.

The article examines advanced works with artificial intelligence, their application in the social sphere, agro-industrial sector, and process automation. The importance of their impact on increasing productivity, improving working conditions and the development of the economy as a whole is highlighted.

The analysis showed that robots with artificial intelligence have immense potential for application in various fields of activity. However, the successful implementation of these technologies requires careful consideration of ethical, social, and economic aspects. It is important to consider possible ethical issues related to autonomous systems and decision-making based on artificial intelligence. In addition, it is important to consider the social consequences of the introduction of such technologies, in particular regarding changes in the labor market and the interaction between people and robots. The economic aspect is also important, as the cost of implementation and potential economic benefits need to be assessed. Ensuring the sustainability and efficiency of the implementation of these technologies in the future requires a comprehensive approach and consideration of all the mentioned aspects. The implementation of artificial intelligence in the production of machines and equipment can open wide opportunities for improving the processes of design, production, and maintenance. Artificial intelligence can be used to optimize designs, identify potential problems, and improve product quality by analyzing large volumes of data. In addition, the use of machine learning algorithms can help automate manufacturing processes, reduce development and testing time for new products, and use resources more efficiently. The use of artificial intelligence can also improve equipment maintenance planning, forecasting of consumables and scheduling of repair work, which will reduce costs and avoid unexpected disruptions in the production process.

Keywords: robotics; artificial intelligence; robots with artificial intelligence.

Fig.: 7. **References:** 16.

**Андрій Манохін¹, Сергій Клименко², Сергій Клименко³, Марина Копейкіна⁴,
Юрій Мельнійчук⁵, Анатолій Чумак⁶, Валерій Кременецький⁷, Віктор Новіченко⁸,
Наталія Новиченко⁹, Андрій Филипович¹⁰**

¹кандидат 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. **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)

²доктор 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. **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)

³кандидат 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. **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)

⁴кандидат 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: atmu1@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)

⁵кандидат 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. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4529-2775>. **SCOPUS Author ID:** [57193381972](https://orcid.org/0000-0003-4529-2775)

⁶кандидат 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. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>
Researcher ID: [AEK-3163-2022](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196). **SCOPUS Author ID:** [58162161100](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)

⁷кандидат фізико-математичних наук,
завідувач відділу «Електронно-зондових досліджень багатофункціональних матеріалів»
Технічний центр НАН України (Київ, Україна)
E-mail: krem@nasu.kiev.ua. **SCOPUS Author ID:** [15842226600](https://orcid.org/0000-0002-5081-4216)

⁸науковий співробітник відділу «Електронно-зондових досліджень багатофункціональних матеріалів»
Технічний центр НАН України (Київ, Україна)
E-mail: vicnicnov13@gmail.com. **SCOPUS Author ID:** [55549106200](https://orcid.org/0000-0002-5081-4216)

⁹науковий співробітник відділу «Електронно-зондових досліджень багатофункціональних матеріалів»
Технічний центр НАН України (Київ, Україна)
E-mail: krem@nasu.kiev.ua

¹⁰науковий співробітник відділу «Фізико-хімічних основ формування надтвердих та наноструктурних матеріалів процесу синтезу»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (Київ, Україна),
E-mail: bochechka@ism.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-5081-4216>

СТРУКТУРНИЙ СТАН КОМПОЗИТІВ, СПЕЧЕНИХ ІЗ ПОРОШКІВ cBN З ПОКРИТТЯМ ЗІ СПОЛУК Ti

Наведено результати досліджень структурного стану композитів, сформованих з порошків cBN із покриттями, отриманими зі сполук Ti CVD методом з використанням газотранспортної реакції. Визначено особливості та кількісні показники їх структури залежно від кількості Ti в складі покриття. Експериментально встановлено, що матриці отриманого композиту сформована субмікронними зернами TiN та TiB₂, а спікання порошку призводить до збільшення параметра кристалічної ґратки TiN у композиті на 10 %, розмір кристалітів фаз у межах окремих зерен при цьому зменшується, а деформація кристалічної ґратки зростає. При цьому також відбувається пересичення TiN азотом, а сформоване покриття суто зорієнтоване в напрямку (022).

Ключеві слова: покриття на зернах cBN; структура композиту; кристалічна ґратка; мікронапруження.

Рис.: 6. Бібл.: 6.

Актуальність теми досліджень. Надтверді композити на основі кубічного нітриду бору (cBN) є важливим компонентом сучасних високотехнологічних систем у машинобудівній промисловості, які дозволяють забезпечувати високу якість, точність та ефективність обробки самих важкооброблюваних конструкційних матеріалів. Світові тенденції в створенні таких інструментальних матеріалів спрямовані на розробку складних за структурою та технологією виготовлення композитів, застосування яких робить можливою реалізацію високошвидкісного різання при високій здатності чинити опір термотрибоактивованим механізмам зношування. Разом з тим необхідно відзначити, що керамічні складові-зв'язуючі в таких композитах зумовлюють певне обмеження їхніх фізико-хіміко-механічних властивостей, що зумовлює актуальність пошуку підходів до модифікації наявних та створення новітніх матеріалів для різальних інструментів. Вказане можливо реалізувати за рахунок міждисциплінарного підходу із застосуванням технологій формування різноманітних покриттів на складових компонентах матеріалів, визначення їхніх структурних особливостей і пов'язаних з цим властивостей для визначення оптимальних сфер використання.

Постановка проблеми. Фізико-механічні та експлуатаційні властивості матеріалів для різальних інструментів багато в чому визначаються їхнім хімічним складом та структурою. Підбір прекурсорів потрібного хімічного складу та зернистості, їх змішування механічними методами далеко не завжди дозволяють отримувати потрібний розподіл компонентів-наповнювачів та елементів матриці, яка виконує роль зв'язки. При цьому товщина прошарків матричних компонентів, що утворюються при спіканні сумішей, не повинна бути меншою, ніж розмір зерна відповідних компонентів.

Одним з підходів, що дозволяють досягти рівномірного розподілу складових компонентів в структурі матеріалів, а також регулювати товщину прошарків, є попереднє нанесення на порошки покриттів, товщина яких може варіюватися в широкому діапазоні – від десятків нанометрів до декількох мікрометрів. У процесі спікання, покриття на зернах основної компоненти композиту відіграє роль зв'язки, розподіленої на міжзеренних межах наповнювача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час розроблена гама різноманітних покриттів на порошки кубічного нітриду бору cBN з використанням різних хімічних сполук та створено багато методів їх формування. Високу ефективність виявлено у покриттів зі сполуками Ti.

У роботі [1] синтезовано різальний матеріал із порошоків cBN з покриттям TiN. Порошки cBN з покриттям TiN були отримані методом рідкофазного осадження із TiF_4 як джерела Ti. Кристалічна фаза шару покриття TiO_x була перетворена в Ti_4O_7 і TiN шляхом спікання в атмосфері та відновлення у вакуумі. Потім він був повністю перетворений у фазу TiN. Шари покриття мали рівномірну товщину ~20–40 нм. Зносостійкість різального інструменту зі створеного композиту покриттям кубічного нітриду бору приблизно в чотири рази більша, ніж у різального інструменту, виготовленого з використанням чистого порошку cBN.

Для формування покриття на частинках cBN, яке при термічній обробці перетворюється в TiN, може бути використане попереднє осадження розпавленої солі титану [2].

Перспективними для нанесення на зерна cBN є склоподібні покриття, які можуть підвищити міцність утримання зерен cBN у композиті та підвищити міцність під час згинання, що підвищує ефективність використання інструментів із cBN при обробці з ударними навантаженнями.

З метою підвищення однорідності мікроструктури та збільшення міжфазної площі зерен, в роботі [3] порошки cBN були покриті нанокристалічним TiN за допомогою золь-гель методу, який не вимагає коригування pH та використання поверхнево-активних речовин або добавок. На поверхні зерен cBN шляхом реакцій гідролізу та конденсації ізо-

пропоксиду титану (IV) утворювався однорідний шар аморфного оксиду титану нанометрової товщини. При цьому, порошок cBN з аморфним покриттям був азотований до кристалічного cBN з нанокристалічним покриттям TiN, який рівномірно покривав поверхню частинок.

У [4] запропоновано використовувати порошки cBN із покриттям TiN, отримані за методикою [3]. Покриття кожного зерна cBN зв'язувальним матеріалом перед спіканням дає можливість отримати мікроструктуру з ідеальним розподілом фаз і, таким чином, забезпечує повну реакцію на межі розділу частинок cBN і сполучного матеріалу. Спостерігалися тонкі шари TiN, які в основному діють як межі розділу між сусідніми частинками cBN. Енергодисперсійна спектроскопія (EDS) для областей між частинками cBN показала піки Ti, які були найвищими за інтенсивністю. Виміряна ширина межі розділу – приблизно 50 нм.

Автори зауважують підвищення твердості для композитів, отриманих із порошків cBN з покриттям TiN, що пов'язано з тим, що для композитів, отриманих з порошків без покриття, характерне неефективне змішування зв'язуючого TiN з частинками cBN, що призводить до сегрегації фази TiN. У подальшому фаза TiN діє як м'які ділянки, що призводить до зниження твердості композиту. З іншого боку, мікроструктура композитів, виготовлених з порошків cBN, покритих TiN, є однорідною – TiN рівномірно розподілений у мікроструктурі, що означало відсутність м'якої фази, що є результатом агрегації TiN.

Зразки, спечені з порошку cBN з покриттям, мають вищі значення міцності при згинанні, ніж зразки з порошку cBN без покриття [4]. Через обмеження техніки механічного змішування зразки з порошком cBN без покриття призводять до неоднорідного розподілу зв'язуючого в матеріалі. Цей неоднорідний розподіл зв'язуючого залишив ділянки з великою кількістю зв'язків cBN-cBN. Частинки cBN, завдяки своїй надзвичайно високій міцності на стискання і стійкості до деформації, зазнали дуже незначної пластичної деформації під час спікання. Це призвело до утворення порожнеч або неповного ущільнення в областях із великими зв'язками cBN-cBN.

Дослідження зносостійкості інструментів, виготовлених із композитів на основі cBN із покриттям TiN, продемонстрували кращу зносостійкість по задній поверхні та меншу шорсткість поверхні заготовки при точінні загартованої сталі.

У статті [5] одержано надтвердий матеріал PcBN з однорідною структурою шляхом спікання при високому тиску порошків cBN, попередньо покритих Ti. Покриття наносили CVD методом із використанням газотранспортної реакції при температурі 1200–1300 К. Транспортними агентами виступали йодиди титану. Результати рентгеноструктурного дослідження порошків з покриттям показали, що їхній фазовий склад становлять cBN, TiN і TiB₂, тобто при осадженні відбувається хімічна взаємодія Ti з cBN. Згідно з даними розрахунків, товщина покриття на порошках KM3/2 становила 0,2 мм, а на порошках марки KM7/5 – від 0,23 до 1,06 мкм. У випадку використання порошків з більшою товщиною покриття зразки після спікання мали тріщини. Особливості структури композитів – відсутність контактів між зернами cBN, у складі зв'язки – субмікронні та нанорозмірні TiN і TiB₂, твердість композиту – 30 ГПа.

З метою підвищення ефективності різальних інструментів з PcBN на вихідні мікропорошки, які використовувались при спіканні композитів, у [6] наносилось покриття на основі титану. Порівняльні дослідження ефективності інструментів, виготовлених з використанням порошку із покриттям, продемонстрували зниження інтенсивності їх зношування при високошвидкісному різанні загартованої сталі у порівнянні з інструментом, оснащеним композитами PcBN, отриманими з порошків без покриттів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З урахуванням наведеного вище, можна зробити висновок, що одним з ефективних напрямків підвищення властивостей матеріалів на основі cBN, а відповідно, і працездатності оснащених ними різальних інструментів, є керування структурою композитів за рахунок нанесення покриттів на вихідні порошки. Водночас відзначаємо, що в проаналізованих роботах недостатньо приділено уваги вивченню структурного стану композитів, сформованих з порошків cBN із покриттям, зокрема кількісним показникам їхньої структури залежно від кількості Ti.

Метою статті є вивчення структурного стану композитів, сформованих з порошків cBN із покриттям, визначення особливостей та кількісних показників їхньої структури залежно від кількості Ti у складі покриття.

Методика досліджень. З метою нанесення покриття використано метод CVD, який дозволяє отримати плівки з рівномірною товщиною на поверхнях складної форми. Перенесення металу реалізовано з використанням йодотранспортної реакції при температурах (1200–1300) К, яка забезпечує утворення на поверхнях зерен cBN продуктів реакції титану, що осаджується, з азотом N та бором. Покриття наносилося на порошки cBN марки KM 14/10, а також на суміш мікропорошків cBN марки KM зернистістю 2/1 та 14/10 та 1,5 % алюмінію Al зернистістю 28/20. Кількість титану, що використовувався в технологічному процесі осадження покриття на поверхню частинок порошку становив 3, 5 та 8 мас.% відповідно (KM 14/10) та 5 % (суміш порошків). З кожної експериментальної партії композитів виготовлено різальні пластини діаметром 7 мм та товщиною 3,18 мм.

Спінання порошків з покриттям проводилося в апараті високого тиску типу «тороїд-20» за тиску 7,0 ГПа і температурах 2300 К протягом 60 с.

Шліфи досліджуваних зразків виготовлювали поліруванням мікропорошками алмазу зернистістю 2/1 і 1/0.

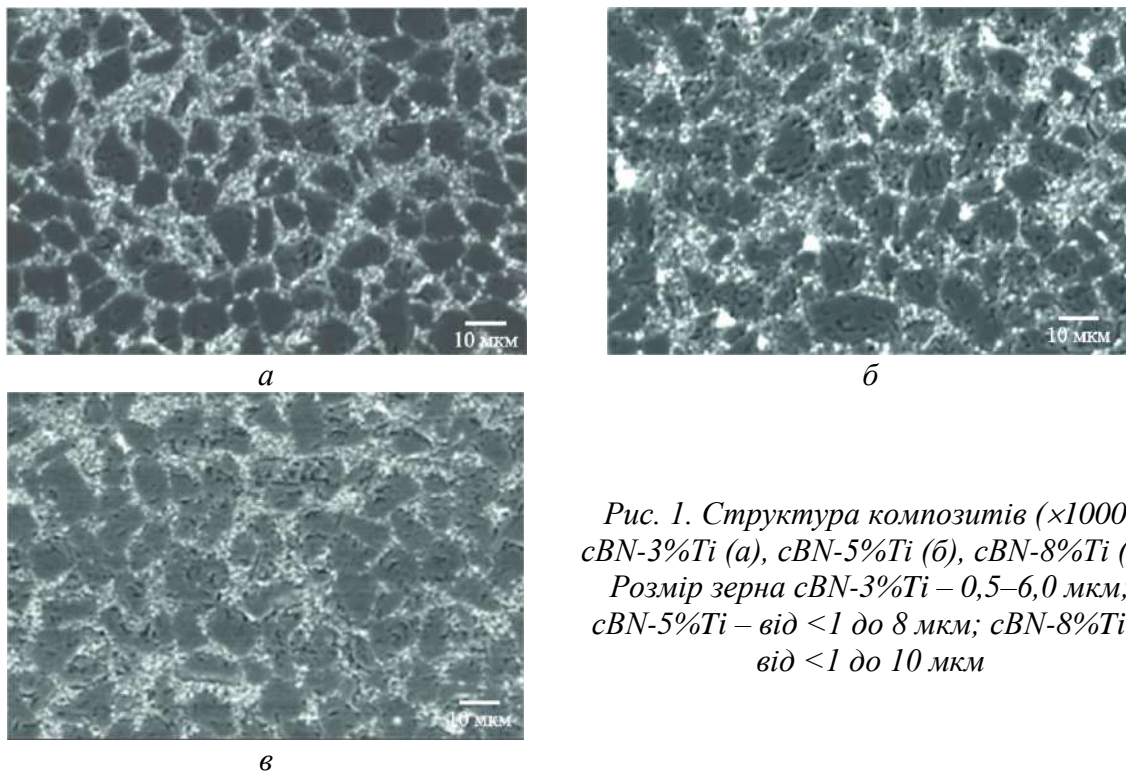
Рентгенівські дослідження проводили за дифрактограмами, отриманими в дискретному режимі на апараті ДРОН-4 (випромінювання $\text{CuK}\alpha$, кутовий інтервал зйомки 20–84 $^\circ$, крок сканування 0,050, експозиція в кожній точці 3 с). Первинну обробку рентгенівських даних виконували методом повнопрофільного аналізу. Для проведення якісного та кількісного фазового аналізу, уточнення параметрів кристалічних ґраток ідентифікованих фазових складових, а також для визначення параметрів реальної структури фаз (розміру блоків когерентного розсіювання, мікродеформації кристалічної решітки, напружень I роду) використовували оригінальний програмний пакет, який включає до себе повний комплекс процедур Рітвельда.

Дослідження розподілу хімічних елементів проведено методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії на сканувальному електронному мікроскопі Tescan MIRA 3. Мікроскоп оснащено стандартним SE2-детектором вторинних електронів Еверхарта-Торнлі, детектором обернено розсіяних електронів (BS) та енергодисперсійним аналізатором рентгенівських спектрів XMaxN 80 (Oxford Instruments); програмним забезпеченням для аналізу зображень Automated AZtecEnergy.

Скануючу електронну мікроскопію проводили на мікроскопі JSM-6490LV з енергодисперсійним спектрометром INKA Energy 350XT, спектрометром з хвильовою дисп. INKA Wave 500 та системою реєстрації картин дифракції зворотнорозсіяних електронів HKL Channel 5 EBSD, JEOL Ltd.

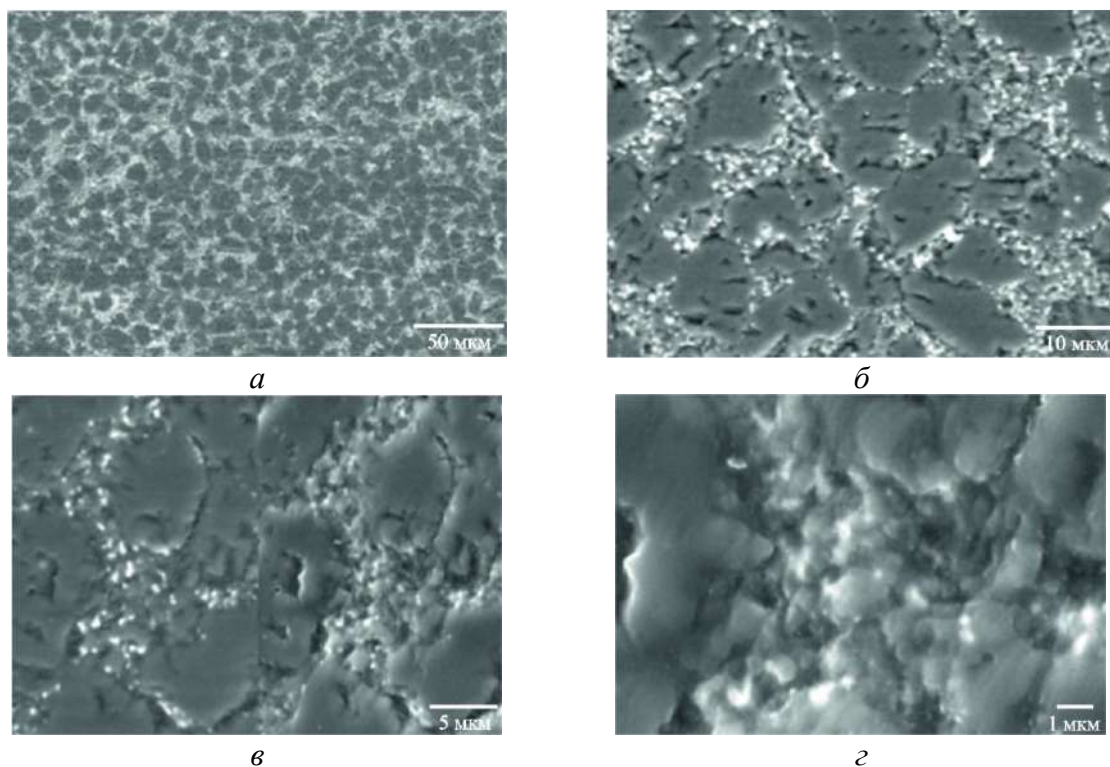
Виклад основного матеріалу. Загальний вид структури композитів, сформованих із порошків cBN з покриттям cBN-3%Ti (а), cBN-5%Ti (б), cBN-8%Ti (в), зображено на рис. 1.

Як видно з наведених знімків, основний показник структури отриманих композитів – рівномірний розподіл керамічної матриці між зернами cBN, досягнутий за рахунок якісної інкапсуляції окремих зерен надтвердої фази у покритті. Ширина прошарків керамічної матриці композитів знаходиться в досить широкому діапазоні і становить 0,4–12 мкм. Найбільші розміри керамічні прошарки мають в області четверних стиків – у цьому випадку вони перевищують розмір зерен cBN. При цьому, ширина зони між двома сусідніми частинками cBN на окремих ділянках становить < 1 мкм.



Для структури всіх отриманих композитів спостерігаються окремі випадки контакту безпосередньо між зернами cBN, кількість яких зменшуються з ростом вмісту титану в матеріалі.

Границі зерен cBN нерівні (рис. 2), з розвиненою складною формою внаслідок руйнування в процесі спікання, а також, ймовірно, у результаті хімічних реакцій при утворенні нітридних плівок на поверхнях зерен.



Зони між зернами cBN заповнені керамічною матрицею. Структура самої керамічної матриці складна і являє собою сукупність субмікронних кристалітів, які містять титан, бор та азот, що відповідає, згідно з результатами рентгеноструктурного аналізу, сполукам TiN (2% мас.) та TiB₂ (1% мас.). Як перший, так і другий фактори сприяють збільшенню міцності зв'язків на міжфазних та міжзеренних границях. Оцінка кількості титану виконана методом мікрорентгеноспектрального аналізу з площинних ділянок розміром 100×100 мкм для зразків cBN-3%Ti, cBN-5%Ti та cBN-8%Ti при цьому становить 0,49, 0,98 та 1,09 % відповідно.

Енергодисперсійна спектроскопія (EDS) області між зернами cBN показала піки Ti, ширина яких становить до 1,5–2 мкм, при загальній ширині зони, насиченої титаном 5 мкм (рис. 3).

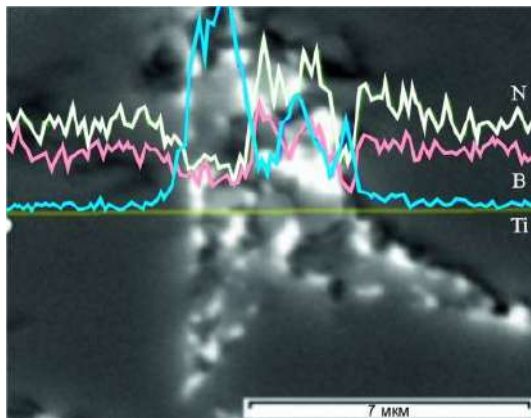


Рис. 3. Зона між зернами cBN (а) та її енергодисперсійна спектроскопія (б)

Максимальна концентрація титану збігається з розташуванням прошарків керамічної матриці в композиті, що видно з рис. 4.

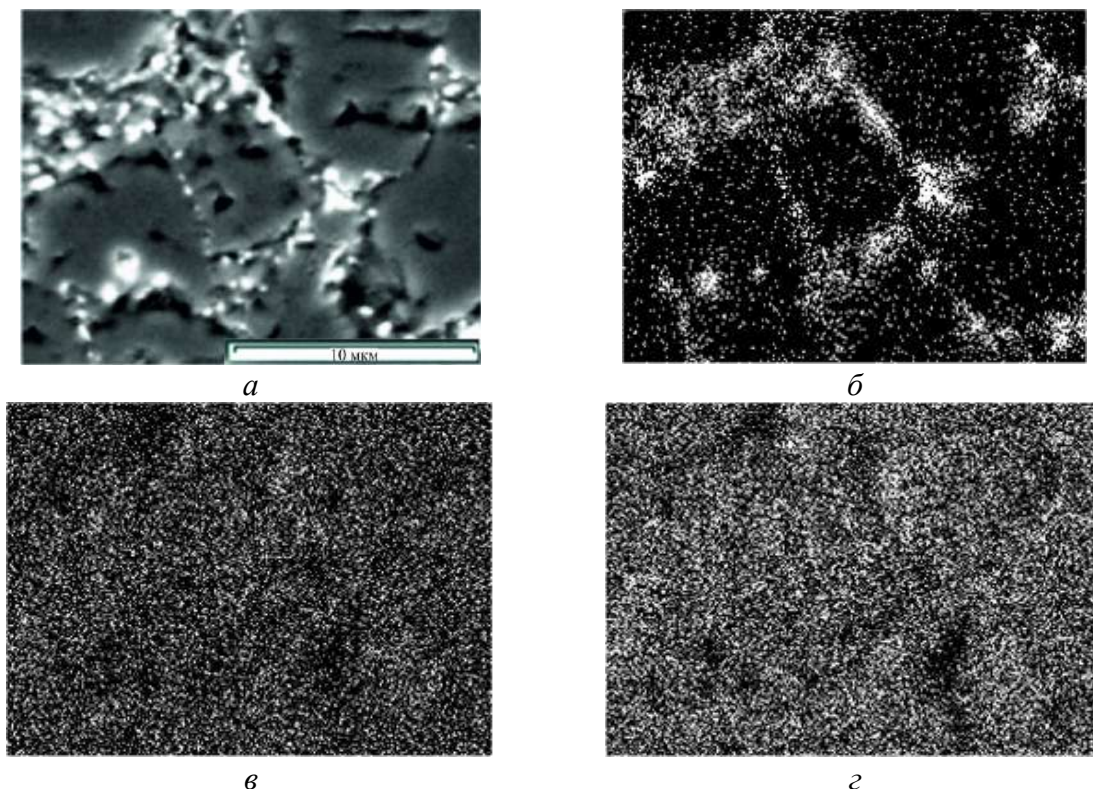


Рис. 4. Шліф ділянки композиту cBN-5%Ti (а) і розподіл хімічних елементів на ній: б – титан; в – бор; г – азот

Результати EDS окремих ділянок керамічної матриці, приведені на рис. 5, демонструють значну зміну вмісту титану, про що свідчить також варіювання освітленості цих зон від яскраво-білого до світло-сірого на зображеннях SEM у режимі фазового контрасту BSE (режим реєстрації відбитих електронів).

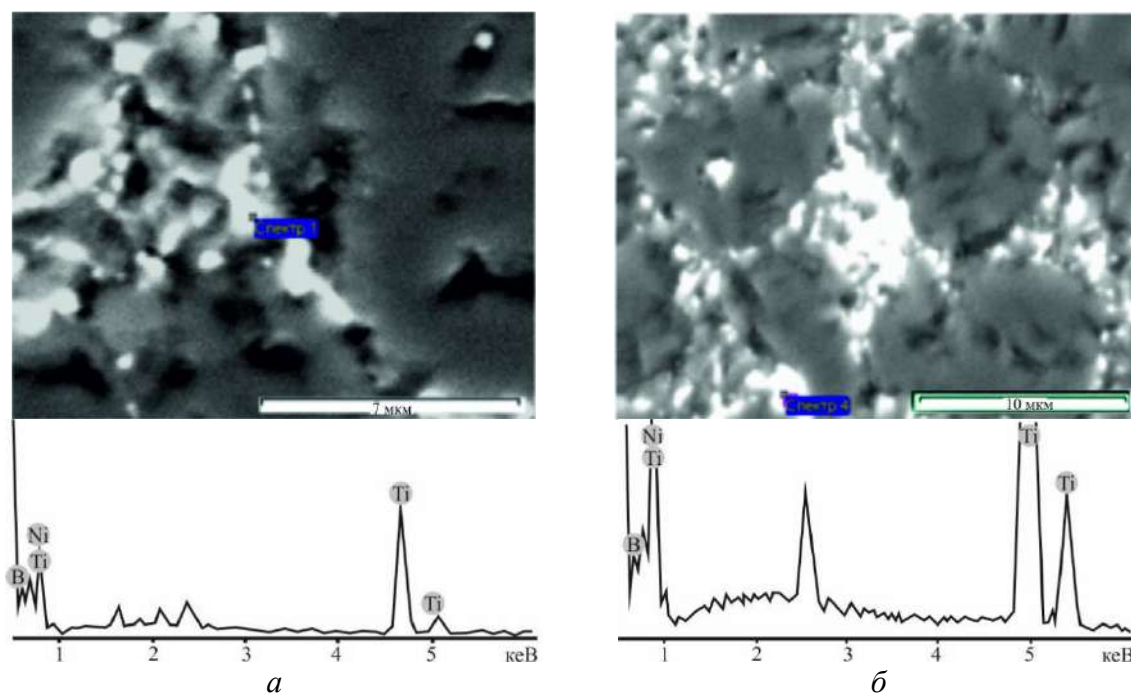


Рис. 5. EDS ділянок керамічної матриці композитів $s\text{BN-3\%Ti}$ (а) та $s\text{BN-5\%Ti}$ (б):
 а – 22,96/35,84 В (ваг./ат.>%); 22,96/35,84 N (ваг./ат.>%); 33,63/11,85 Ti (ваг./ат.>%);
 б – 8,11/19,94 В (ваг./ат.>%); 21,64/41,08 N (ваг./ат.>%); 70,24/38,998 Ti (ваг./ат.)

Результати рентгенівського фазового аналізу вихідних порошків складу 5% Ti (мас.), 1,5 % (об.) Al свідчать про те, що, крім кубічного нітриду бору $s\text{BN}$, досліджувані зразки містить продукти його хімічної взаємодії з титаном (фази TiN та TiB_2), а також інтерметалід TiAl (рис. 6). Спінання цього порошку при температурі 2300 °C та тиску 7,7 ГПа не призводить до суттєвих змін фазового складу, проте параметр кристалічної решітки нітриду TiN збільшується від 0,4244 нм до 0,4253 нм [6], а дифрактограма спеченого зразка окрім відбитків, притаманних зазначеним вище фазам, містить також ще одно відбиття, належність якого до якої-небудь з можливих фаз-продуктів взаємодії компонентів вихідної суміші, не встановлена.

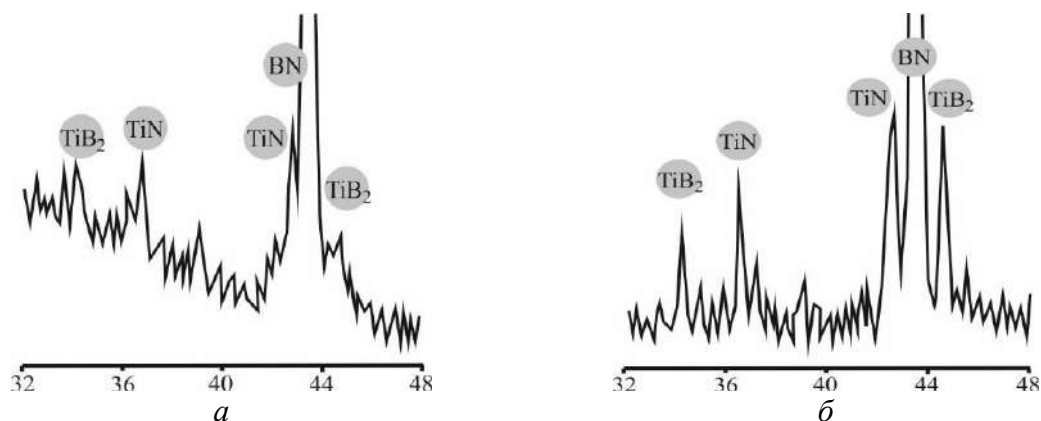


Рис. 6. Фрагменти дифрактограм порошку (а) та компакту (б)

При переході від порошку з покриттям до композиту форма дифракційних піків дещо змінюється, що пов'язано із напруженнями I або/та II роду, які притаманні досліджуваному зразкам. Результати визначення параметрів мікронапружень (розрахунок за формулою $\frac{E}{\mu} \cdot \frac{\Delta}{d_0}$ при $E = 256$ ГПа, $\mu = 20$ для TiN) наведені в табл. 1.

Аналіз результатів рентгенівського структурного аналізу дають підстави припустити, що у випадку, що розглядається, при осадженні Ti на поверхню частинок порошку cBN формуються окремі конгломерати продуктів реакції з фаз TiN, TiB₂ та TiAl. Судячи з результатів, отриманих для TiN, мікронапруження в окремих зернах утворюваного нітриду відсутні, а поверхневий натяг сформованого при цьому покриття є, але визначеного напрямку він не має, про що свідчить велика похибка у визначенні параметрів решітки TiN та значна дисперсія значень, розрахованих за різними відбиттями значень напружень I роду (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Параметри структури фаз cBN та TiN

Зразок	cBN			TiN			
	Параметр решітки, нм	Мікронапруження II роду		Параметр решітки, нм	Мікронапруження II роду		Макронапруження I роду, ГПа
		розмір блоків, нм	деформація решітки, %		розмір блоків, нм	деформація решітки, %	
Порошок	0,36161(2)	56(7)	0,11(1)	0,4244(1)	>100	–	-0,05 – -0,04
Композит	0,36162(5)	27(1)	0,24(2)	0,42535(3)	20(3)	0,47(1)	-0,02

При спіканні зазначеного порошку з покриттям розмір кристалітів фаз у межах окремих зерен зменшується, а деформація кристалічної решітки зростає. Вочевидь також відбувається пересичення TiN азотом (суттєве збільшення параметра його решітки), а сформована при цьому плівка суто зорієнтована в напрямку (022).

Висновки. На основі даних SEM встановлено, що застосування методу CVD з газотранспортним осадженням Ti на поверхню зерен cBN дозволяє керувати структурою композиту та отримати рівномірний розподіл керамічної матриці між зернами cBN за умови інкапсуляції в ній окремих зерен надтвердої фази. Значення ширини прошарків керамічної матриці композитів знаходиться в діапазоні від 0,4 (на міжзеренних границях) до 10-12 мкм (у зонах потрійних стиків). Структура матриці – субмікронні зерна TiN та TiB₂.

Спікання порошку призводить до збільшення параметра кристалічної ґратки нітриду TiN на 10 % – від 0,4244 нм у покритті до 0,4253 нм у композиті, розмір кристалітів фаз у межах окремих зерен при цьому зменшується, а деформація кристалічної ґратки зростає. При цьому також відбувається пересичення TiN азотом (суттєве збільшення параметра його ґратки), а мікронапруження в окремих зернах утворюваного нітриду відсутні.

Список використаних джерел

1. Improving wear resistance of cBN-based cutting tools using TiN coating on cBN powder surface / Y.-S. Lee, T.-W. Kang, S.-W. Shin, D.-W. Kim // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2021. – № 631. – P. 127758.
2. Daoush, W. M. Fabrication of TiN/cBN and TiC/diamond coated particles by titanium deposition process / W. M. Daoush, H. S. Park, S. H. Hong // Transact. of Nonferrous Met. Soc. of China. – 2014. – № 24(11). – Pp. 3562-3570.
3. A sol-gel route to nanocrystalline TiN coated cubic boron nitride particles // M. A. Umer, H. S. Park, D. J. Lee, H. J. Ryu, S. H. Hong // J. of Alloys and Compounds. – 2011. – № 509(41). – Pp. 9764-9769.
4. Polycrystalline cubic boron nitride sintered compacts prepared from nanocrystalline TiN coated cBN powder / M. A. Umer, P. H. Sub, D. J. Lee, H. J. Ryu, S. H. Hong // Mat. Sci. and Eng: A. – 2012. – № 552. – P. 151-156.

5. Одержання надтвердих композитів з однорідною структурою при спіканні в умовах високого тиску порошків cBN, вкритих титаном / М. П. Беженар, С. М. Коновал, Т. О. Гарбуз, В. Т. Весна, В. М. Ткач, Я. М. Романенко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – 2015. – Вып. 18. – С. 360-365.

6. Інструмент, виготовлений із порошків кубічного нітриду бору з CVD покриттям / А. С. Манохін, Ю. О. Мельничук, С. А. Клименко, М. П. Семенько, Г. А. Петасюк, А. Г. Филипович, С. А. Клименко, Ю. Е. Рижов // Інструментальне матеріалознавство : зб. наук. праць. – Київ : ІНМ НАН України, 2023. – Вип. 26. – С. 305-314.

References

1. Lee, Y.-S., Kang, T.-W., Shin, S.-W., Kim, D.-W. (2021). Improving wear resistance of cBN-based cutting tools using TiN coating on cBN powder surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 631, 127758.

2. Daoush, W. M., Park, H. S., Hong, S. H. (2014). Fabrication of TiN/cBN and TiC/diamond coated particles by titanium deposition process. *Transact. of Nonferrous Met. Soc. of China*, 24(11), 3562–3570.

3. Umer, M. A., Park, H. S., Lee, D. J., Ryu, H. J., Hong, S. H. (2011). A sol–gel route to nanocrystalline TiN coated cubic boron nitride particles. *J. of Alloys and Compounds*. 509(41). 9764–9769.

4. Umer, M. A., Sub, P. H., Lee, D. J., Ryu, H. J., Hong, S. H. (2012). Polycrystalline cubic boron nitride sintered compacts prepared from nanocrystalline TiN coated cBN powder. *Mat. Sci. and Eng: A*, 552, 151–156.

5. Bezhenar, M. P., Konoval, S. M., Garbuz, T. O., Vesna, V. T., Tkach, V. M., Romanenko, Ya. M. (2015). Oderzhannia nadtverdykh kompozytiv z odnoridnoiu strukturoiu pry spikanni v umovakh vysokoho tysku poroshkiv cBN, vkrytykh tytanom [Production of superhard composites with a uniform structure during high-pressure sintering of cBN powders coated with titanium]. *Porodopasrushayustchiy i metalloobratyvayustchiy instrument – tehnika i tehnologiya ego isgotovleniya i primeneniya – Rock-destructive and metal-working instrument - technique and technology of its manufacture and application*, 18, 360–365.

6. Manokhin, A. S., Melniichuk, Yu. O., Klymenko, S. A., Semen'ko M. P., Petasyuk, G. A., Fylypovych, A. G., Kkyumenko, S. An., Ryzhov, Yu. E. (2023). Instrument, vyhotovlenni iz poroshkiv kubichnoho nitrydu boru z CVD pokryttiam [A tool made from cubic boron nitride powders with CVD coating]. *Instrumental'ne materializnavstvo – Instrumental materials science*, 26, 305–314.

Отримано 13.03.2024

UDC 621.793: 621.81: 548

**Andrii Manokhin¹, Sergii Klymenko², Serhii Klymenko³, Maryna Kopieikina⁴,
Yurii Melniychuk⁵, Anatolii Chumak⁶, Valerii Kremenetskyi⁷, Victor Novichenko⁸,
Natalia Novychenko⁹, Andrii Fylypovych¹⁰**

¹ Candidate of 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. **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)

² 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. **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)

³ Candidate of 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. **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)

⁴Candidate of 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: 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)

⁵Candidate of 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. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4529-2775>. **SCOPUS Author ID:** [57193381972](https://orcid.org/0000-0003-4529-2775)

⁶Candidate of 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. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>

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

⁷Candidate of Physics and Mathematics Sciences,
Head of the Department of electron Probe Research of multifunctional Materials
Technical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: krem@nasu.kiev.ua. **SCOPUS Author ID:** [15842226600](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)

⁸Researcher of the Department of electron Probe Research of multifunctional Materials
Technical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: yicnicnov13@gmail.com. **SCOPUS Author ID:** [55549106200](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)

⁹Researcher of the Department of electron Probe Research of multifunctional Materials
Technical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: krem@nasu.kiev.ua

¹⁰ Researcher of the Department of Physicochemical bases of formation of superhard
and nanostructured materials by synthesis process
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: bochcheka@ism.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-5081-4216>

STRUCTURAL STATE OF COMPOSITES SINTERED FROM cBN POEDERS WITH A COATING OF COMPOUNDS Ti

The paper presents the results of experimental studies of the structural state of composites obtained at high temperatures and pressures from cBN powders with coatings deposited by CVD from Ti compounds using a gas transport reaction. The features and quantitative parameters of the structure of the composites depending on the presence of Ti in the coating were determined. It has been experimentally established that the matrices of the obtained composites are formed by submicron grains of TiN and TiB₂, the quantitative differences of which correspond to the concentration of Ti in the coating - from 3 to 8 %. The structure of the obtained composites is characterized by a uniform distribution of the ceramic matrix between the cBN grains, which is achieved due to the high-quality encapsulation of individual grains of the superhard phase in the coating. The ceramic layers have the largest dimensions (up to 10-12 μm) in the area of triple joints, the width of the zone between two adjacent cBN particles is < 1 μm. When moving from a coated powder to a composite, the shape of the diffraction peaks changes, which is associated with the stresses of the first and/or second kind inherent in the studied samples. Sintering of the powder leads to a decrease in the size of the blocks from 56 nm to 27 nm, an increase in the lattice strain from 0.11 to 0.24 %, in TiN - to an increase in the lattice parameter in the composite by 10% (from 0.4244 nm to 0.4253 nm), a decrease in the size of crystallites within individual grains from 100 nm to 20 nm, and an increase in the lattice strain by 0.47 %. At the same time, TiN nitride is supersaturated with nitrogen, which is a significant increase in its lattice parameter, and the coating formed in this case is exclusively oriented in the (022) direction.

Keywords: coating on cBN grains; composite structure; crystal lattice; microstresses.

Fig.: 6. **References:** 6.

Оксана Небеснюк¹, Аліна Ніконова², Дмитро Алексієвський³, Зоя Ніконова⁴

¹ кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

E-mail: 0811oksana@gmail.com, **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212030902>

² кандидат технічних наук, професор кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

E-mail: nk_alina@ukr.net, **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57212035624>

³ доктор технічних наук, доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

E-mail: lasian2017@ukr.net, **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57208393870>

⁴ кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

E-mail: nz.a@ukr.net, **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57212037253>

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ЯКІСТЬ ПРИЛАДОВИХ СТРУКТУР

Застосування методу інтерферометрії дало можливість суттєво доповнити та уточнити інформацію про морфологію, характер дефектів нарощених шарів епітаксійних композицій (ЕК), виявлених методами вибіркового травлення за допомогою металографічного мікроскопа. Порівняльним дослідженням ступеня дефектності пластин після кожного з етапів їх виготовлення встановлено, при яких операціях технологічного процесу утворюються конкретні види дефектів. Запропоновано методику отримання якісних напівпровідникових приладів та інтегральних схем на основі різних видів ЕК з високим питомим опором робочого шару.

Ключові слова: епітаксійні композиції; напівпровідникові прилади; бездислокаційний кремній; дефекти; відпал; пластина.

Табл.: 2. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. У сучасному виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних схем широко застосовуються епітаксійні композиції (ЕК): кремнієві одношарові епітаксійні структури (КОЕС), кремнієві звернені епітаксійні структури (КЗЕС) та кремнієві структури з діелектричною ізоляцією (КСДІ). Актуальним завданням є ретельне вивчення дефектів таких структур та технологічних чинників, що значно впливають на їхню якість на різних етапах процесу виготовлення.

На сьогодні чітко проявляються тенденції створення найскладніших електронних пристроїв на основі багат шарових епітаксійних структур. При цьому формуються дуже високі вимоги до електрофізичних властивостей і якості структури кожного шару, ставляться завдання створення досконалих та різких р-п переходів і гетерограниць на великих площах епітаксійних композицій. Особливо великі перспективи обіцяє застосування епітаксійних композицій при виготовленні напівпровідникових приладових структур.

Постановка проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень показує [1-5], що найбільш істотним джерелом дефектів в епітаксійних композиціях є напруженості, що виникають у них у процесі кристалізації або подальшого охолодження температури нарощування. До основних причин виникнення напруженостей слід віднести:

1) відмінність періодів решітки матеріалів, які створюють сполуки, що і викликає появу напруженість невідповідності;

2) відмінність коефіцієнтів термічного розширення цих матеріалів або нерівномірний розподіл температури по товщині і поверхні нарощуваного шару, що є джерелом термічних напруженостей епітаксійної композиції;

3) наявність градієнта складу за товщиною епітаксійного шару;

4) підвищена концентрація дефектів структури на межах розділу.

Встановлено, що в умовах досить тривалої (0,2...3,0 години) дії напруженості й високих температур (1400...1500 К) протікають процеси дефектоутворення як у нарощеній плівці, так і в підкладці композиції, на розвиток яких впливають структурні недосконалості вихідної підкладки [4-7].

Метою роботи є дослідження залежності густини дефектів у підкладці і нарощеному шарі кремнієвих епітаксійних композицій від технологічних чинників та розробка системи, що має підвищену стійкість до електроміграції та одночасно запобігає ерозії кремнію в контактних вікнах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для досліджень при виготовленні епітаксійних кремнієвих композицій широко використовуються пластини бездислокаційного кремнію, як основної підкладки. Встановлено [8], що в процесі епітаксії на монокристалічну підкладку діють, крім термічних напруг, ще й напруги з боку шару, що осаджується на неї. Подібна дія виявляється особливо сильною при вирощуванні епітаксійних шарів товщиною 300...500 мкм.

Великий вплив на утворення дефектів при епітаксійному нарощуванні має якість підготовки підкладок перед цією операцією. Численними дослідженнями порівняно тонких (до 20-30 мкм) епітаксійних шарів [9] показано, що забруднення або пошкодження поверхні підкладки викликають утворення в ній дефектів упаковки, двійників та макроскопічних виступів. При зверненій епітаксії до структурної досконалості епітаксійного шару не пред'являються високі вимоги, оскільки у напівпровідникових приладових структурах, що виготовляються на основі КЗЕС, робочим шаром служить об'єм монокристалічної підкладки. Отже, при зверненій епітаксії головною стає проблема утворень у процесі нарощування дефектів у підкладці, а не в епітаксійному шарі. Процеси дефектоутворення в підкладці при нарощуванні товстого (близько 300 мкм) епітаксійного шару на сьогодні мало вивчені.

Авторами встановлено, що при використанні нарощування бездислокаційних підкладок у робочому шарі ЕК містяться дислокації, щільність яких досягає значень порядку 10^3 см^{-2} і вище. Вивчення факторів, що визначають утворення дислокацій у підкладці у процесі епітаксії, має велике практичне значення.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження були взяті підкладки товщиною 260 мкм з кристалографічною орієнтацією поверхні, виготовлених з монокристалів бездислокаційного кремнію з питомим опором 10-50 Ом·м. Дефекти структури виявлялися виборчим травленням і досліджувалися за допомогою металографічного та растрового електронного мікроскопів.

При проведенні досліджень підкладки піддавалися впливу різних технологічних чинників. Також проводилася обробка робочої сторони поверхні (на якій відбувалося нарощування): хіміко-механічне полірування (ХМП) з видаленням шару товщиною 1-2 мкм і 20 мкм; механічне полірування (МП) алмазною пастою з величиною зерна 1,0 мкм і 5 мкм. Обробка неробочої (зворотної) сторони підкладок також була різною: хіміко-механічне полірування, шліфування, гетерування - шліфування вільним абразивом з подальшим неглибоким механічним поліруванням. Після нарощування ЕК були зашліфовані та відполіровані ХМП з обох боків до товщини 80 мкм з боку робочого шару (підкладки) та 170-180 мкм – з боку опорного (нарощеного) шару.

Результати дослідження щільності дислокацій в обох ЕК наведено у таблиці 1.

У процесі досліджень встановлено, що в усіх ЕК робочий шар містить дислокації, щільність яких лежить в інтервалі $3 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. Таким чином, відпрацьована технологія нарощування забезпечить досить високу їх структурну досконалість. Однак, є резерви подальшого підвищення якості ЕК. Одним із них, як випливає з даних табл. 1, є

вдосконалення процесу механічної обробки поверхні підкладок. У тих випадках, коли робоча сторона підкладки піддавалася хіміко-механічному поліруванню, щільність дислокацій у підкладці після нарощування в середньому нижча, ніж при механічному поліруванні. Виняток становлять підкладки зі шліфованою неробочою (зворотною) стороною. Найкращі результати авторами отримані при використанні ХМП із підвищеною до 20 мкм товщиною віддаленого шару – $3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$.

Таблиця 1 – Середня густина дислокацій в ЕК, нарощених на бездислокаційні безсвірлові підкладки

Обробка поверхні підкладки		Густина дислокацій $10^3, \text{ см}^{-2}$	
Робоча сторона	Зворотна сторона	У робочому шарі КЗЕС	В опорному шарі КЗЕС
Хіміко-механічне полірування з товщиною віддаленого шару 1-2 мкм	Хіміко-механічне полірування	1	4
	Механічна полірування	1	10
	Гетерування	0,3	8
	Шліфування	4	18
Хіміко-механічне полірування з товщиною віддаленого шару 20 мкм	Механічна поліровка	0,4	5
Механічне полірування з розміром зерна абразиву 1,0 мкм	-	2	6
Механічне полірування з розміром зерна абразиву 0,5 мкм	-	1	22

Джерело: розроблено авторами.

Обробка неробочої поверхні підкладки також впливає на якість шару ЕК приладових напівпровідникових структур. При однаковій обробці робочої сторони підкладки шліфування її зворотної сторони призводить до зростання щільності дислокацій у робочому шарі ЕК у середньому в 4,5 раза, а гетерування – навпаки, до зниження у 2,5 раза порівняно з механічним поліруванням зворотного боку. Водночас застосування ХМП неробочої сторони в порівнянні з механічним поліруванням не дає помітного покращення якості ЕК.

Ступінь структурної досконалості опорного (нарощеного) шару ЕК також залежить від способу обробки як робочої, так і зворотної сторін підкладок. З табл. 1 видно, що механічне полірування робочої сторони підкладки, порівняно з ХМП, зумовлює помітне підвищення щільності дислокацій в опорному шарі, тоді як у робочому шарі ЕК вона практично однакова. До зростання щільності дислокацій в опорному шарі призводить також застосування шліфування зворотної сторони підкладки в порівнянні з іншими способами її обробки. Значно сильніше, ніж щільність дислокацій, залежить від способу обробки робочої сторони підкладки щільність дефектів упаковки в нарощеному шарі. Збільшуючись від значення $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ (у середньому за дослідженими зразками) при ХМП $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ при механічному поліруванні.

Великий вплив на утворення структурних дефектів при зверненій епітаксії має присутність у бездислокаційних підкладках свірл-дефектів. Незалежно від способу обробки поверхні підкладок в усіх КЗЕС були присутні свірлові смуги мікрodefектів А-типу, також спостерігалися аналогічні за формою та розподілом смуги з високою щільністю дислокацій, дефектів упаковки в опорному шарі та з підвищеною щільністю дислокацій у робочому шарі. Вплив свірлових смуг на утворення дислокацій у робочому та опорному шарах КЗЕС ілюструють експериментальні дані наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Відношення густини дислокацій у смугі свірл-дефекта та в останньому об'ємі ЕК (обробка робочої сторони підкладки - ХМП)

Обробка робочої сторони підкладки	Робочий шар КЗЕС	Опорний шар КЗЕС
Хіміко-механічне полірування	4	2
Механічне полірування	180	8
Гетерування	16	2

Джерело: розроблено авторами.

Авторами встановлено (табл. 2), що свірл-дефекти значно впливають на утворення дислокацій у робочому шарі КЗЕС. Наявність у ньому смуг із високою щільністю дислокацій збільшує на порядок середню величину щільності дислокацій цього шару, тобто різко знижують якість ЕК.

Висновки. Дослідження процесів дефектоутворення в ЕК на основі КСДІ показало, що при використанні бездислокаційних підкладок, де можуть мати місце А-мікрорефекти, саме вони генерують дислокації, вже починаючи з технологічної операції виготовлення ізолюючого шару діоксиду кремнію. Дислокації утворюються на ділянках перетину смуги мікрорефектів із роздільними канавками. У такому випадку мікрорефекти є джерелами, а концентратори напруженості на канавках - рушійною силою процесу генерації дислокацій у монокристалічній кишені. При подальшій операції осадження полікристалічного шару кремнію виникають термопружні напруги, які посилюють процес генерації і щільність дислокацій зростає на порядок до 10^4 см^{-2} .

Підвищення температури відпалу також істотно впливає на дефектоутворення в епітаксійних композиціях, що призводить до погіршення електричних характеристик та параметрів приладових структур, а отже, їхньої якості і надійності в експлуатації.

Для дослідження впливу високих температур було взято пластини бездислокаційного високоомного кремнію діаметром 60 мм, товщиною 300, 500 і 1000 мкм після механічної обробки, які піддавалися відпалу в атмосфері водню при температурі $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 10 хвилин. За допомогою вибіркового травлення було виявлено дислокації в периферійній ділянці відпалених пластин.

Авторами встановлено, що активними джерелами генерації дислокацій служать мікросколи та мікроподряпини на краях пластин. Сукупність процесів генерації дислокацій макро- та мікросколами, мікроподряпинами та ділянками з деформаційними ґратками сприяє утворенню (при різних високотемпературних технологічних операціях) периферійного кільця на кремнієвих пластинах шириною 1...4 мм з високою щільністю дислокацій ($\sim 10^3 \text{ см}^{-2}$).

Мікротріщини на краях пластин викликали при відпалі утворення ліній ковзання, що поширюються кристалографічними напрямками на відстані до 1 мм. При епітаксії довжина ліній ковзання, що виходять із мікротріщин, досягає 5...10 мм. У ряді випадків мікротріщини ініціюють утворення ступенів зсуву, що пронизують всю товщину підкладки та епітаксійного шару і мають довжину до 0,6 діаметра пластини.

Слід зазначити, що на робочій площі пластини, де дефекти механічної обробки були відсутні, утворення дислокацій при відпалі спостерігалось лише на пластинах, які містять мікрорефекти А-типу. За наявності мікрорефектів інших типів робоча площа відпалених пластин вільна від дислокацій.

Оскільки в ході експериментальних досліджень було встановлено, що на ступінь структурної досконалості робочої площі готових кремнієвих композицій впливають тільки мікротріщини, то для усунення таких дефектів потрібно було коригувати саме цю операцію. Використання мікроінтерферометрії дозволило якісно провести візуальну оцінку мікрорельєфу такого зразка, достовірно визначити їх глибину і висоту.

Отримані експериментальні результати дозволяють зробити висновок, що для виробництва напівпровідникових приладових структур на основі ЕК з низькою щільністю дислокацій необхідно використовувати бездислокаційні підкладки, що не містять смуг мікродофектів А-типу. За інших рівних умов найкраща якість ЕК досягається при застосуванні ретельного хіміко-механічного полірування підкладки з її робочого боку та гетерування зі зворотної.

Список використаних джерел

1. Lin, J.-T. A novel planar-type body connected FinFET device fabricated by self-align isolation-last process [Electronic resource] / J.-T. Lin // *Solid-State and Integrated Circuit Technology. New technologies.* – 2019. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/224205328_A_novel_planar-type_body-connected_FinFET_device_fabricated_by_self-align_isolation-last_process.
2. Odinson, V. V. New processing equipment for innovative technologies micro, nano - and radio electronics / V. V. Odinson, G. Ya. Pavlov // *Technology and designing in the electronic equipment.* – 2011. – Vol. 3. – Pp. 41-43.
3. Levinson, D. I. Modeling the distribution of impurities in the preparation of heavily instrumental silicon layers using high-energy treatment / D. I. Levinson, A. Y. Nikonov, O. Y. Nebesnyuk // *Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development.* – 2013. – Pp. 10-13.
4. Green, M. A. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond / M. A. Green // *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures.* – 2002. – April, № 14(1). – Pp. 65-70.
5. Brown, A. S. Limiting efficiency of multiple band solar cells / A. S. Brown, M. A. Green // *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference.* – Kyiv, 2011. – Pp. 246-249.
6. Norman, A. G. InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells / A. G. Norman, M. C. Hanna, P. Dippo, D. Levi // *Prepared for the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition Lake Buena Vista (Florida January 3–7, 2005).* – Golden, Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 2005. – Pp. 3-7.
7. Solar cells heterostructures with InAs quantum dots obtained by liquid phase epitaxy / I. E. Maronchuk, S. Yu. Erochin, T. F. Kulutkina et al. // *Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion.* – Osaka, Japan, 2013. – Pp. 11-18.
8. Pathways to 40% Efficient Concentrator Photovoltaics / R. R. King, D. C. Law, C. M. Fetzez, R. A. Sherif, K. M. Edmondson, S. Kurtz // *Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference.* – Barcelona, 2015. – Pp. 30-37.
9. Nebesniuk, O. Y. Technological Features of Real Contact Systems' Production for Nanosystem Equipment / O. Y. Nebesniuk, Z. A. Nikonova, A. A. Nikonova // *Journal of Nano- and Electronic Physics.* – 2022. – № 14(5). – Pp. 5-14.

References

1. Jyi-Tsong, L. (2019). A novel planar-type body connected FinFET device fabricated by self-align isolation-last process. *Solid-State and Integrated Circuit Technology. New technologies.* https://www.researchgate.net/publication/224205328_A_novel_planar-type_body-connected_FinFET_device_fabricated_by_self-align_isolation-last_process.
2. Odinson, V.V., Pavlov, G.Ya. (2011). New processing equipment for innovative technologies micro, nano - and radio electronics. *Technology and designing in the electronic equipment*, 3, 41-43.
3. Levinson, D.I., Nikonov, A.Y., Nebesnyuk, O.Y. (2013). Modeling the distribution of impurities in the preparation of heavily instrumental silicon layers using high-energy treatment. *Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development*, 10-13.
4. Green, M.A. (2012). Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*, (14(1)), 65-70.
5. Brown, A. S., Green, M. A. (2011). Limiting efficiency of multiple band solar cells. *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (pp. 246–249). Kyiv.
6. Norman, A.G., Hanna, M.C., Dippo, P. et al. (2015). InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells. *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition* (pp. 3-7). Florida, USA.

7. Maronchuk, I.E., Erochin, S.Yu., Kulutkina, T.F. et al. (2013). Solar cells heterostructures with InAs quantum dots obtained by liquid phase epitaxy. *Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (pp. 11–18). Osaka, Japan.

8. King, R.R., Law, D.C., Fetez, C.M., Sherif, R.A., Edmondson, K.M., Kurtz, S. (2015). Pathways to 40% Efficient Concentrator Photovoltaics. *Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (pp. 30-37). Barcelona, Spain.

9. Nebesniuk, O.Y., Nikonova, Z.A., Nikonova, A.A. (2022). Technological Features of Real Contact Systems Production for Nanosystem Equipment. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, (14(5)), 5-14.

Отримано 04.01.2024

UDC 621.315.592

Oksana Nebesniuk¹, Alina Nikonova², Dmitriy Alekseevskiy³, Zoya Nikonova⁴

¹PhD, Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebny of the Zaporizhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: 0811oksana@gmail.com. **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212030902>

²D.Sc, Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebny of the Zaporizhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: nk_alina@ukr.net. **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57212035624>

³D.Sc, Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebny of the Zaporizhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: lasian2017@ukr.net. **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57208393870>

⁴Ph.D., Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebny of the Zaporizhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: nz.a@ukr.net. **SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57212037253>

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON QUALITY OF INSTRUMENT STRUCTURES

In the modern production of semiconductor devices and integrated circuits, epitaxial compositions are widely used: silicon single-layer epitaxial structures, silicon inverted epitaxial structures and silicon structures with dielectric insulation. An urgent task is a thorough study of the defects of such structures and technological factors that significantly affect their quality at various stages of the manufacturing process.

The purpose of the work is to study the dependence of the density of defects in the substrate and the built-up layer of silicon epitaxial compositions on technological factors and to develop a system that has increased resistance to electromigration and at the same time prevents erosion of silicon in the contact windows.

Substrates with a thickness of 260 μm with a crystallographic surface orientation made of single crystals of dislocation-free silicon with a resistivity of 10-50 Ohm·m were taken for the study. Defects in the structure were detected by selective etching and investigated using metallographic and scanning electron microscopes. Processing of the working side of the surface was also carried out: chemical-mechanical polishing with removal of a layer 1-2 microns and 20 microns thick; mechanical polishing with diamond paste with a grain size of 1.0 μm and 5 μm. The processing of the non-working side of the substrates was also different: chemical-mechanical polishing, grinding, hetering - grinding with a free abrasive followed by shallow mechanical polishing. After growth, the epitaxial compositions were polished and grinded by chemical-mechanical polishing on both sides to a thickness of 80 μm on the substrate side and 170-180 μm on the side of the built-up layer.

During research, the substrates were exposed to various technological factors. The obtained experimental results allow us to conclude that to produce semiconductor device structures based on epitaxial compositions with a low density of dislocations, it is necessary to use dislocation-free substrates that do not contain bands of A-type microdefects. All other things being equal, the best quality of epitaxial compositions is achieved by applying thorough chemical-mechanical polishing of the substrate on its working side and heterogenization on the reverse side.

Keywords: epitaxial compositions; semiconductor devices; dislocation-free silicon; defects; annealing; plate.

Table: 2. **References:** 9.

Олексій Самоїленко¹, Гао Сінмін²

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: o.samoilenko@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0403-1707>

²аспірант кафедри конструювання машин Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: 18152022190@163.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5473-5438>

**ПІДГОТОВКА МОДЕЛЮВАННЯ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ,
ВСТАНОВЛЕНОЇ У ФРАКТАЛЬНИХ ЛЕЩАТАХ**

Стаття є публікацією науково-методичного характеру. Стаття присвячена підготовці віртуального експерименту фрезерної обробки складнопрофільної деталі, встановленої у фрактальних лещатах. Визначено недостатню представленість фрактальних лещат на ринку обладнання та їхню завищену вартість. Підібрані основні параметри та їхні рекомендовані значення для раніше розробленої математичної моделі процесу обробки. Запропоновано матрицю варіантів проведення віртуального експерименту, з якої обрано декілька варіантів, найбільш придатних для подальшого моделювання та порівняння із результатами натурного експерименту.

Ключові слова: лещата; фрактальні губки; фрезерування; складнопрофільна деталь; моделювання; віртуальний експеримент.

Рис.: 5. Табл.: 3. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Машинобудування і металообробка завжди потребували можливості обробки деталей, які мають складні форми і виходять за межі традиційних тіл обертання або ж тіл, обмежених паралельними та перпендикулярними площинами. Крім проблеми виготовлення таких деталей, постає проблема їхнього закріплення на металорізальному верстаті для подальшої обробки.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування фрактальних лещат [1]. Твердження [2], що фрактальні лещата практично відсутні на ринку верстатного оснащення, потребує деякого уточнення. Вказані лещата іноді зустрічаються серед пропозицій деяких маркетплейсів, однак, дійсно – пропозиція дуже обмежена, тому загальні та спеціалізовані пошукові машини мережі Інтернет можуть їх не виявляти.

Найбільший китайський маркетплейс *AliExpress* пропонує фактично дві моделі фрактальних лещат, конструкція яких відповідає патенту США № US1059545A [7].

Лещата [8] (рис. 1) виготовлені з конструкційної сталі та являють собою верстатне пристосування, яке призначене для використання в промисловості в умовах ремонтного та одиничного виробництва.



Рис. 1. Промислові фрактальні лещата із конструкційної сталі

Джерело:

https://a.aliexpress.com/_EGbo3EN



Рис. 2. Промислові фрактальні лещата з нержавіючої сталі

Джерело:

https://a.aliexpress.com/_ExwSmKh



Рис. 3. Любительські фрактальні лещата з алюмінієвого сплаву

Джерело:

https://a.aliexpress.com/_Ew1hdZL

Фрактальні лещата [6] (рис. 2) мають, по суті, таку саму конструкцію, але виготовлені з нержавіючої сталі та мають деякі другорядні відмінності, що не впливають на функціонал. Обидві конструкції лещат мають 4-рівневі фрактальні губки.

Лещата [5] (рис. 3) мають дещо спрощену конструкцію в порівнянні з двома попередніми. Вони мають 3-рівневі фрактальні губки та виготовлені з алюмінієвого сплаву. Ці лещата вбачаються практично непридатними для використання у важкому машинобудуванні та металообробці, однак можуть бути використані в хобійній діяльності.

Розглянуті фрактальні лещата є немеханізованими та мають ручний привід затиску. Тобто, непридатні для використання в автоматизованому виробництві.

Також спільною негативною рисою представлених фрактальних лещат є їхня висока вартість. Станом на час написання статті, вартість лещат була такою (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняння вартості фрактальних лещат (орієнтовні значення)

Модель фрактальних лещат	Вартість, дол. США		
	Виріб	Доставка	Загальна
4-рівневі лещата з конструкційної сталі	7304	311	7615
4-рівневі лещата з нержавіючої сталі	4171	445	4616
3-рівневі лещата з алюмінієвого сплаву	1678	415	2093

Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, вартість фрактальних лещат (які є лише верстатним пристосуванням, до того ж немеханізованим, з ручним приводом) співрозмірна з вартістю самого фрезерного верстата (не тільки на вторинному, а й на первинному ринку) та вбачається необґрунтовано завищеною. Надзвичайно висока ціна незрозуміла, оскільки в конструкції фрактальних лещат не використовуються дорогі матеріали, а поверхні деталей цих лещат описані типовими поверхнями (площинами, циліндрами, конусами тощо), тобто такими поверхнями, які були доступні для металообробки початку ХХ століття на момент їхнього патентування.

Втім, цілком можливо, що в недалекому майбутньому можуть скластись такі сприятливі обставини в промисловості, що фрактальні лещата отримають «друге життя», як це ставалося із багатьма іншими винаходами й технічними рішеннями. Наприклад, дульнозарядна гвинтівка в ХХІ столітті вбачається анахронізмом, проте й сьогодні виготовляється деякими провідними виробниками як мисливська зброя преміум-сегмента [9].

Тому доцільним є подальше дослідження такого цікавого технічного об'єкта, як фрактальні лещата поряд з іншими універсальними лещатами із цілком ймовірною перспективою суттєвого розширення їхнього застосування в осяжній перспективі.

Постановка задачі. З іншого погляду, фрактальні лещата та їхнє моделювання становлять значний академічний інтерес.

Фрактальні лещата зі своєю схемою затиску деталі займають деяке проміжне положення між традиційними лещатами з двома затискними елементами (паралельними губками) та оригінальними лещатами [3], у яких затискні елементи виконані у вигляді еластичних ємностей, заповнених деякою стійкою до стискання субстанцією, яка при затиску складнопрофільної деталі ніби обволікує її за законом Паскаля. Якщо абстрагуватись від об'ємної моделі до плоскої, то з деякими допущеннями та умовностями можна вважати, що фрактальні губки взаємодіють із деталлю також за законом Паскаля.

В той же час, передбачається, що після затиску деталі губки набувають властивості деякого моноліту [2] і взаємодіють із закріпленою деталлю не лише за допомогою нормальних реакцій, але й силами тертя в місці контакту кінцевих елементів губок з поверхнею деталі.

Тобто створюється досить складана схема затиску, при якій немає остаточної ясності, як поведе себе процес механічної обробки закріпленої в лещатах деталі.

Мета дослідження. Метою дослідження на даному етапі є визначення основних положень плану віртуального експерименту, який полягає в математичному моделюванні обробки складнопрофільної деталі, встановленої у фрактальних лещатах.

Пропонується для використання сучасний засіб візуального моделювання динамічних систем *Simulink* [10] з пакета *MATLAB*.

Результати досліджень. Попередньо була запропонована плоска математична модель [2] механічної обробки (фрезерування) складнопрофільної деталі, закріпленої у фрактальних лещатах при деяких попередніх допущеннях.

Представлена математична модель базується на розрахунковій схемі (рис. 4).

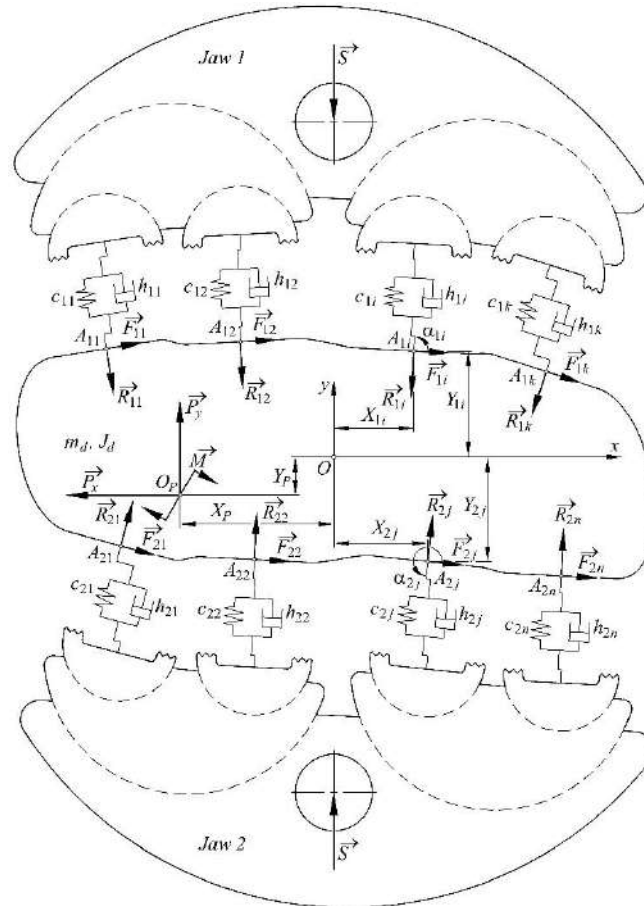


Рис. 4. Результуюча розрахункова схема обробки складнопрофільної деталі, встановленої у фрактальних лещатах

Джерело: розроблено авторами.

Математична модель являє собою систему із трьох диференційних рівнянь другого порядку (1), які описують плоскопаралельні зміщення оброблюваної деталі в площині *XU* та крутильні зміщення відносно осі *Z*.

$$\begin{cases}
 m_d \cdot \ddot{x} + \sum_{i=1}^k R_{1i} \cos \alpha_{1i} + \sum_{j=1}^n R_{2j} \cos \alpha_{2j} + \sum_{i=1}^k F_{1i} \cdot \sin \alpha_{1i} + \sum_{j=1}^n F_{2j} \cdot \sin \alpha_{2j} = P_x(t) \\
 m_d \cdot \ddot{y} + \sum_{i=1}^k R_{1i} \sin \alpha_{1i} + \sum_{j=1}^n R_{2j} \sin \alpha_{2j} + \sum_{i=1}^k F_{1i} \cdot \cos \alpha_{1i} + \sum_{j=1}^n F_{2j} \cdot \cos \alpha_{2j} = P_y(t) \\
 J_d \cdot \ddot{\phi} + \sum_{i=1}^k R_{1i} \cdot \sin \alpha_{1i} \cdot (X_{1i} + x) + \sum_{i=1}^k R_{1i} \cdot \cos \alpha_{1i} \cdot (Y_{1i} + y) + \sum_{i=1}^k F_{1i} \cdot \sin \alpha_{1i} \cdot (Y_{1i} + y) + \\
 + \sum_{i=1}^k F_{1i} \cdot \cos \alpha_{1i} \cdot (X_{1i} + x) + \sum_{j=1}^n R_{2j} \cdot \sin \alpha_{2j} \cdot (X_{2j} + x) + \sum_{j=1}^n R_{2j} \cdot \cos \alpha_{2j} \cdot (Y_{2j} + y) + \\
 + \sum_{j=1}^n F_{2j} \cdot \sin \alpha_{2j} \cdot (Y_{2j} + y) + \sum_{j=1}^n F_{2j} \cdot \cos \alpha_{2j} \cdot (X_{2j} + x) = M(t) + P_x(t) \cdot (Y_p + y) + P_y(t) \cdot (X_p + x)
 \end{cases} \quad (1)$$

де

$$\begin{cases} R_{1i} = h_{1i} \cdot \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} + c_{1i} \cdot \sqrt{x^2 + y^2} + \frac{S}{k} \\ R_{2j} = h_{2j} \cdot \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} + c_{2j} \cdot \sqrt{x^2 + y^2} + \frac{S}{n} \end{cases} \quad (2)$$

та

$$\begin{cases} F_{1i} = R_{1i} \cdot f \\ F_{2j} = R_{2j} \cdot f \end{cases} \quad (3)$$

Експлікація елементів математичної моделі – компонентів формул (1...3) подана в табл. 2.

Таблиця 2 – Елементи математичної моделі та їхні рекомендовані значення

Величина	Загальне позначення	Розмірність	Значення
Маса деталі	m_d	кг	1...5
Момент інерції деталі	J_d	кг·м ²	0,5...1,5
Зусилля затиску	S	Н	3000...5000
Кількість кінцевих губок першої та другої фрактальних губок	k, n	б/р	$k = n = 4$
Координати точок контакту кінцевих губок і деталі	X_{1i}, Y_{1i} X_{2j}, Y_{2j}	м	визначаються після затиску деталі
Кути орієнтації кінцевих губок в точках контакту з деталлю	α_{1i}, α_{2j}	рад	визначаються після затиску деталі
Результуюча сили різання вздовж осі X	P_x	Н	1000...3000
Результуюча сили різання вздовж осі Y	P_y	Н	2000...5000
Момент різання	M	Н·м	100...500
Координати точки прикладення силових факторів процесу різання	X_p, Y_p	м	визначаються за потребами моделювання
Сили реакції кінцевих губок у точках контакту	R_{1i}, R_{2j}	Н	var
Сили тертя між кінцевими губками і поверхнею деталі в точках контакту	F_{1i}, F_{2j}	Н	var
Коефіцієнт тертя в точках контакту	f	б/р	0,3
Коефіцієнти пружності кінцевих губок у точках контакту	c_{1i}, c_{2j}	Н/м	20000...50000
Коефіцієнти демпфування кінцевих губок у точках контакту	h_{1i}, h_{2j}	Н·с/м	визначаються за аналогією
Зміщення деталі вздовж осі X	X	м	var
Зміщення деталі вздовж осі Y	Y	м	var
Кутове зміщення деталі відносно осі Z	φ	рад	var
Час моделювання	t	с	0...10 ⁴

Джерело: розроблено авторами.

Представлена математична модель певною мірою універсальна – вона передбачає теоретично необмежену кількість рівнів фрактальних губок.

Однак, з метою раціонального використання наявних обчислювальних ресурсів, на думку авторів, слід обмежитись трьома (як на рис. 4) або чотирма фрактальними рівнями. По-перше, така кількість рівнів відповідає конструкції реальних лещат, представленим на ринку промислового обладнання. По-друге, менша кількість рівнів (1 або 2) зводить нанівець переваги фрактальних лещат.

Процес фрезерування, який прийнято за основний робочий процес, в контексті математичного моделювання характеризується такими силовими факторами (на площині):

– сумарна сила різання P , яка представлена ортогональними складовими P_x та P_y , що виходять із геометричного центру фрези O_p ;

– сумарний момент різання M , який прикладений у тій же точці O_p .

Сама точка O_p характеризується координатами X_p, Y_p відносно геометричного центру лещат – точки O .

Таким чином, процес фрезерування забезпечує потрібні силові фактори як для плоскої моделі.

Силові фактори процесу різання не є постійними в часі, а залежать від ряду випадкових чинників, зокрема:

– геометричних параметрів інструменту (відхилення радіусу інструменту, кількість z зубців фрези тощо);

– неоднорідність матеріалу оброблюваної деталі (зокрема, наявність раковин);

– температурні та інші випадкові процеси тощо.

Тому попередньо приймається, що випадкові відхилення значень силових факторів процесу фрезерування будуть в межах $\pm 10\%$.

Наступним етапом підготовки до математичного моделювання є визначення руху фрези (рис. 5) відносно точки O .

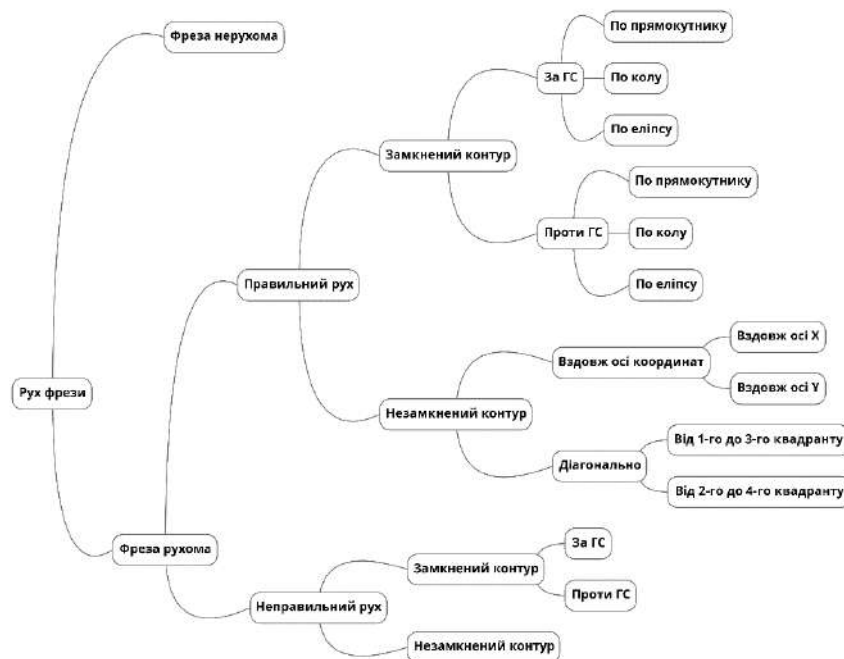


Рис. 5. Варіанти руху фрези в контексті математичного моделювання

Джерело: розроблено авторами.

При нерухомій фрезі вважається, що точка O_p нерухома, тобто її координати X_p, Y_p незмінні.

Натомість при рухомій фрезі одна або обидві координати X_p, Y_p змінні в часі:

– при русі вздовж координатної осі одна з координат змінна в часі, а інша незмінна;

– рух за прямокутною траєкторією є комбінацією рухів вздовж координатних осей, тобто, фреза обходить деякий наперед заданий прямокутний контур;

– рух по діагоналі передбачає, що обидві координати X_p, Y_p одночасно змінюються в часі.

Оскільки в універсальних фрезерних верстатах величина подачі виставляється органами керування верстата й у процесі фрезерування є величиною незмінною, то вважається, що при згаданих рухах (вздовж осі, по прямокутнику та діагонально) координати X_p, Y_p змінюються за лінійним законом:

$$X_p(t) = X_{p_0} + v_x \cdot t \text{ та (або) } Y_p(t) = Y_{p_0} + v_y \cdot t, \quad (4)$$

де X_{p_0}, Y_{p_0} – деякі початкові значення, m ;

v_x, v_y – швидкість подачі фрези вздовж координатних осей, m/c , причому $v_x = const$ та $v_y = const$.

Передбачається, що рух по колу та еліпсу, а також неправильне переміщення можуть бути реалізовані на верстаті з ЧПК, при цьому координати X_p, Y_p (4) змінюються за нелінійним законом, тобто $v_x = var$ та $v_y = var$.

Рух «за годинниковою стрілкою» (ГС) або «проти годинникової стрілки» має значення в контексті зустрічного або супутнього фрезерування. При цьому вважається, що в усіх випадках фреза має обертання в «позитивному» напрямку, тобто, «проти годинникової стрілки».

В усіх варіантах руху фрези вважається, що вона не виходить за межі деталі. Тобто відсутнє переривчасте різання, а силові фактори процесу фрезерування ніколи не набувають нульових значень.

Головною метою віртуального експерименту на цьому етапі є порівняння заданої та реальної траєкторій фрези й аналіз впливу параметрів пружно-демпфуючих елементів, зусилля затиску тощо на результат.

На підставі аналізу елементів математичної моделі (табл. 2), варіантів руху фрези (рис. 5) та деяких вищезгаданих допущень складається морфологічна матриця варіантів проведення віртуального експерименту (табл. 3).

Таблиця 3 – Морфологічна матриця варіантів проведення віртуального експерименту (неповна)

Параметр	Значення	
1	2	
1. Рух фрези	1.1. Фреза нерухома 1.2. Вздовж осі X 1.3. Вздовж осі Y 1.4. Діагонально від 1-го до 3-го квадранту 1.5. Діагонально від 2-го до 4-го квадранту 1.6. Проти ГС по прямокутнику 1.7. Проти ГС по колу 1.8. Проти ГС по еліпсу	1.9. За ГС по прямокутнику 1.10. За ГС по колу 1.11. За ГС по еліпсу 1.12. Проти ГС за неправильним замкненим контуром 1.13. За ГС за неправильним замкненим контуром 1.14. За неправильним незамкненим контуром
2. Маса деталі	2.1. 1 кг 2.2. 3 кг 2.3. 5 кг	
3. Момент інерції деталі	3.1. 0,5 кг·м ² 3.2. 1,0 кг·м ² 3.3. 1,5 кг·м ²	
4. Результуюча сили різання вздовж осі X	4.1. 1000 Н 4.2. 2000 Н 4.3. 3000 Н	
5. Результуюча сили різання вздовж осі Y	5.1. 2000 Н 5.2. 3500 Н 5.3. 5000 Н	

Закінчення таблиці 3

Параметр	Значення
6. Момент різання	6.1. 100 <i>H·м</i> 6.2. 300 <i>H·м</i> 6.3. 500 <i>H·м</i>
7. Зусилля затиску	7.1. 3000 <i>H</i> 7.2. 4000 <i>H</i> 7.3. 5000 <i>H</i>
8. Зворотний зв'язок	8.1. Відсутній (розімкнена модель) 8.2. Наявний (замкнена модель)

Джерело: розроблено авторами.

При цьому, якщо в табл. 2 значення елементу математичної моделі подане у вигляді діапазону, то рекомендується для цього елементу брати три варіанти значень:

- ближче до нижньої межі діапазону;
- ближче до верхньої межі діапазону;
- середнє арифметичне або середнє геометричне значення.

Технологічна система «верстат – лещата – інструмент – заготовка» є замкненою динамічною системою із від'ємним зворотним зв'язком [4]. Однак, в порядку віртуального експерименту слід провести незначну кількість досліджень саме з розімкненою системою (без зворотного зв'язку) з подальшим порівнянням з рештою досліджень.

Навіть така неповна матриця передбачає понад 20 тисяч варіантів проведення віртуального експерименту:

$$N = 14 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 = 20412 .$$

Тому проведення однофакторного експерименту є недоцільним та фактично неможливим з огляду витрат часу та раціонального використання наявних обчислювальних потужностей.

Для проведення багатфакторного експерименту попередньо обрано 10 найбільш характерних комбінацій параметрів:

$$X_1 = 1.4 - 2.3 - 3.3 - 4.3 - 5.3 - 6.3 - 7.1 - 8.2$$

$$X_2 = 1.5 - 2.3 - 3.3 - 4.3 - 5.3 - 6.3 - 7.3 - 8.2$$

$$X_3 = 1.6 - 2.3 - 3.3 - 4.3 - 5.3 - 6.3 - 7.1 - 8.2$$

$$X_4 = 1.9 - 2.3 - 3.3 - 4.3 - 5.3 - 6.3 - 7.3 - 8.2$$

$$X_5 = 1.4 - 2.3 - 3.1 - 4.3 - 5.3 - 6.3 - 7.1 - 8.2$$

$$X_6 = 1.5 - 2.3 - 3.3 - 4.1 - 5.3 - 6.3 - 7.3 - 8.2$$

$$X_7 = 1.6 - 2.3 - 3.3 - 4.3 - 5.1 - 6.3 - 7.1 - 8.2$$

$$X_8 = 1.9 - 2.3 - 3.3 - 4.3 - 5.3 - 6.3 - 7.1 - 8.2$$

$$X_9 = 1.4 - 2.3 - 3.3 - 4.3 - 5.3 - 6.3 - 7.1 - 8.1$$

$$X_{10} = 1.9 - 2.3 - 3.3 - 4.3 - 5.3 - 6.3 - 7.3 - 8.1$$

Доцільність того чи іншого параметра визначатиметься наявністю реально існуючого верстатного обладнання, інструменту, оснащення та витратних матеріалів, які визначатимуть натурний експеримент і порівняння його результатів із результатами експерименту віртуального.

Висновки.

1. Фрактальні лещата представлені на ринку верстатного оснащення, але в дуже обмеженому асортименті та з невиправдано завищеною вартістю.

2. Кількість можливих комбінацій параметрів віртуального експерименту обчислюється десятками, а то й сотнями тисяч. Тому проведення однофакторного віртуального експерименту не тільки недоцільне, але й неможливе на практиці. Слід зосередитись на багатфакторному експерименті на базі 10...12 комбінацій параметрів.

3. Комбінації параметрів для багатофакторного експерименту слід обирати залежно від наявної матеріальної бази (металообробне обладнання, оснащення до нього тощо) з перспективою порівняння результатів віртуального і натурного експериментів.

Список використаних джерел

1. Кузнецов, Ю. М. Передумови використання системно-морфологічного підходу та теорії фракталів при створенні лещат для об'єктів складної форми / Ю. М. Кузнецов, Г. Сінмін, О. В. Самойленко // Наукові вісті КПІ. – 2021. – № 4. – С. 52-57. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.4.261849>.
2. Кузнецов, Ю. М. Створення математичної моделі процесу фрезерування складнопрофільної деталі, закріпленої у фрактальних лещатах / Ю. М. Кузнецов, Г. Сінмін, О. В. Самойленко // Перспективні технології та прилади. – 2023. – № 22. – С. 74-80. DOI: <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-11>.
3. Лещата [Електронний ресурс] : пат. 21917 Україна : В25В1/00. № u200611012 ; заявл. 18.10.2006 ; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 4. – 3 с. – Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/304575>.
4. Струтинський, В. Б. Динамічні процеси в металорізальних верстатах : монографія / В. Б. Струтинський, В. М. Дрозденко. – Київ : Основа-Принт, 2010. – 440 с.
5. 3 stage black aluminum fractal vise for hobby [Electronic resource] / AliExpress. [aliexpress.com](https://a.aliexpress.com/_Ew1hdZL). – Access mode: https://a.aliexpress.com/_Ew1hdZL.
6. 4 stage stainless fractal vise for use [Electronic resource] / AliExpress. [aliexpress.com](https://a.aliexpress.com/_ExwSmKh). – Access mode: https://a.aliexpress.com/_ExwSmKh.
7. Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape [Electronic resource] : patent US1059545A United States : B25B5/163. No. US1912685288A – 10 p. – Access mode: <https://patents.google.com/patent/US1059545A/en>.
8. Fractal Vise [Electronic resource] / AliExpress. [aliexpress.com](https://a.aliexpress.com/_EGbo3EN). – Access mode: https://a.aliexpress.com/_EGbo3EN.
9. Model 700 Ultimate [Electronic resource] / Remington. Remington [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.remarms.com/rifles/muzzleloading/model-700-ultimate>.
10. Simulink – Simulation and Model-Based Design. MathWorks – Makers of MATLAB and Simulink [Electronic resource] / MATLAB & Simulink. – Access mode: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.

References

1. Kuznetsov, Yu.M., Sinmin, H., & Samoilenko, O.V. (2021). Prerequisites for using the system-morphological approach and the theory of fractals in the creation of vices for objects of complex shape. *Scientific news of KPI*, (4), 52–57. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.4.261849>
2. Kuznetsov, Yu.M., Sinmin, H., & Samoilenko, O.V. (2023). Creation of a mathematical model of the milling process of a complex profile part fixed in a fractal vise. *Promising technologies and devices*, (22), 74–80. <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-11>.
3. Kuznetsov, Yu.M., Khamuiela, T.O., & Panchenko, M.M. (2007). Vise (Patent of Ukraine No. 21917). National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/304575>.
4. Strutynskiy, V.B., & Drozdenko, V.M. (2010). *Dynamic processes in metal cutting machines*. Osнова-Prynt.
5. 3 stage black aluminum fractal vise for hobby – AliExpress. (n.d.). [aliexpress.com](https://a.aliexpress.com/_Ew1hdZL). https://a.aliexpress.com/_Ew1hdZL
6. 4 stage stainless fractal vise for use – AliExpress. (n.d.). [aliexpress.com](https://a.aliexpress.com/_ExwSmKh). https://a.aliexpress.com/_ExwSmKh
7. Kunze, P.K. (1913). Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape (Patent USA № US1059545A). <https://patents.google.com/patent/US1059545A/en>.
8. Fractal Vise – AliExpress. (n.d.). [aliexpress.com](https://a.aliexpress.com/_EGbo3EN). https://a.aliexpress.com/_EGbo3EN.
9. Model 700 Ultimate (n.d.). Remington. <https://www.remarms.com/rifles/muzzleloading/model-700-ultimate>.
10. Simulink – Simulation and Model-Based Design. (n.d.). MathWorks – Makers of MATLAB and Simulink – MATLAB & Simulink. <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.

Отримано 13.02.2024

Oleksii Samoilenko¹, Gao Xingmin²

¹PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: o.samoilenko@kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0403-1707>

²Postgraduate Student at the Department of Machine Design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (People Republic of China)

E-mail: 18152022190@163.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5473-5438>

SIMULATION PREPARATION OF THE MILLING PROCESSING OF THE PART INSTALLED IN THE FRACTAL VICE

The article is a publication of scientific and methodical character. The article is devoted to the preparation of a virtual experiment of milling processing of a complex profile part, which is installed in a fractal vice. It was determined that fractal vices are presented on the technological equipment market in a very limited range. At the same time, the cost of fractal vices is unreasonably high. The cost is commensurate with the cost of the milling machine itself. However, modeling the processing of a part mounted in a fractal vise is of considerable academic interest. Fractal vices use Pascal's law on the plane (with some assumptions). The mathematical model proposed earlier was further developed. The model is flat and consists of a system of three differential equations of the second order. The equations describe plane-parallel and torsional movements of the part. Selected main parameters and their recommended values for the mathematical model of the processing process. At this stage, the main goal of the virtual experiment is to compare the set and real trajectories of the milling cutter. Also, the goal is to analyze the influence of parameters of elastic-damping elements, clamping force, etc. on the result. A matrix of options for conducting a virtual experiment is proposed. The matrix provides a large number of possible movements of the cutter relative to the part (simple, complex, locked, unlocked). It was determined that the matrix of options allows for a large number of possible processing options. From this set, several options are selected, the most suitable for further modeling and comparison with the results of a natural experiment. It is believed that the technological system "machine – vice – tool – workpiece" is a closed dynamic system with negative feedback. However, it is necessary to investigate the behavior of the system without feedback and compare it with the rest of the experiments.

Key words: vise; fractal jaws; milling; complex profile part; modeling; virtual experiment.

Fig.: 5. Table: 3. References: 10.

Юрій Яровий¹, Володимир Фролов², Сергій Сапон³, Ірина Ісаєнко⁴

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри цифрових технологій в інжинірингу

Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

E-mail: yarovoy.u.v@op.edu.ua. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-6997-4108>. **ResearcherID:** KBB-1945-2024

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

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

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: s.sapon@gmail.com **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431> **ResearcherID:** G-7764-2014

⁴магістр

Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

E-mail: elisdechart@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ОБТОЧУВАННІ ХРОМОМОЛІБДЕНОВОЇ СТАЛІ

Стаття присвячена дослідженню залежності шорсткості поверхні від режимів різання (подачі, глибини та швидкості різання) при обточуванні хромомолібденової сталі. Побудову математичної моделі та перевірку адекватності виконано за методикою повного факторного дослідження типу 2³. Встановлено, що на шорсткість поверхні при обточуванні найбільше впливає подача та швидкість різання; показано, що глибина різання суттєво не впливає на шорсткість поверхні. Пошук оптимальних значень подачі, глибини та швидкості різання, який доповнює проведені дослідження, виконано на основі статично-математичного методу Тагучі.

Ключові слова: шорсткість поверхні; швидкість різання; подача; глибина різання; планування експерименту; метод Тагучі.

Рис.: 4. Табл.: 5. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Розвиток машинобудівного виробництва відбувається шляхом впровадження сучасних технологій, обладнання, різального інструменту, які дозволяють отримати задану якість виробу. Якість виробу є комплексним показником. Якість поверхні характеризується фізико-механічними (твердість, деформаційне зміцнення, наклеп) та геометричними (похибка форми, шорсткість поверхні, хвилястість) параметрами. Шорсткість поверхні впливає на експлуатаційні характеристики виробу. Конструкторські вимоги до шорсткості поверхні визначають режими різання при обробці деталей. Дослідженням впливу режимів різання на шорсткість поверхні присвячено багато наукових публікацій. Але фактично подібні дослідження є вузько спрямованими, оскільки розглядають окремі найбільш поширені марки сталі. Таким чином, дослідження впливу режимів різання на шорсткість поверхні при обробці спеціальних матеріалів (хромомолібденових сталей та титанових сплавів) є актуальною темою дослідження.

Постановка проблеми. Основними параметрами, які впливають на вибір режимів різання, є матеріал деталі та шорсткість поверхні. Проте рекомендовані програмним забезпеченням або довідниковою літературою режими різання не завжди є оптимальними та прийнятими для технологічного устаткування. Сучасні дослідження впливу режимів різання на шорсткість поверхні характеризуються відсутністю комплексності. Одні дослідження присвячені визначенню оптимальних режимів різання, інші – впливу режимів різання на шорсткість поверхні. Одночасне застосування двох різних підходів дозволить дослідити вплив режимів різання на шорсткість поверхні, а також визначити оптимальні режими різання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На шорсткість обробленої поверхні діють різноманітні фактори, які поділяються на три основні групи [1]: фактори, пов'язані з геометрією процесу різання; фактори, пов'язані з пластичною та пружною деформацією обробленого матеріалу; фактори, пов'язані з виникненням вібрацій різального інструменту.

У працях [1-3] показано, що шорсткість поверхні залежить від подачі, радіуса закруглення вершини різця, головного та допоміжного кутів у плані. Найбільш розповсюдженим виразом для розрахунку шорсткості є наступний [4; 5; 7; 10]:

$$Rz = \frac{s^2}{8r} \quad (1)$$

де r – радіус закруглення вершини різця, мм;
 s – величина подачі, мм/об.

Середнє арифметичне відхилення оціненого профілю Ra рекомендують визначати за виразом [4]

$$Ra = \frac{Rz}{4} = \frac{s^2}{32r}. \quad (2)$$

Вирази (1) та (2) не враховують властивості матеріалу, що обробляється.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Шорсткість поверхні є параметром, який впливає на експлуатаційні характеристики виробу. Вирази (1) та (2) не враховують швидкість різання та глибину різання, які є важливими параметрами при виконанні чорнових та чистових операцій обробки.

Дослідження [5-10] доводять, що шорсткість поверхні також залежить від режимів різання (подачі, швидкості різання, глибини різання) та параметрів різального інструменту (радіусу закруглення, головного та допоміжного кутів у плані), але дослідження подібного типу проводяться окремо для різних матеріалів, різального інструменту та режимів різання.

Метою статті є дослідження впливу режимів різання на шорсткість поверхні при обточуванні сталі 38ХМ (сталь конструкційна легована, хромомолібденова) та визначення оптимальних режимів різання для неї.

Виклад основного матеріалу. Технологічні фактори механічної обробки поділяються на стаціонарні та керовані. До стаціонарних факторів належать: вид, властивості, стан оброблюваного та інструментального матеріалів, початкова форма та розміри заготовки, схема базування, траєкторія руху при обробці. До керованих факторів відносять режими різання та геометричні параметри інструменту.

Традиційно рівняння в теорії різання записуються у ступеневому вигляді. Необхідно дослідити, як впливають швидкість різання, глибина різання та подача на шорсткість поверхні оброблюваної деталі зі сталі 38ХМ. Рівняння для шорсткості поверхні представимо у вигляді:

$$Ra = cs^\alpha t^\beta v^\gamma, \quad (3)$$

де c – постійний коефіцієнт;
 α, β, γ – показники ступеня;
 t – глибина різання, мм
 v – швидкість різання, м/хв.

Рівняння (3) після логарифмування має вигляд:

$$\ln Ra = \ln c + \alpha \ln s + \beta \ln t + \gamma \ln v. \quad (4)$$

Представимо його у поліномному вигляді:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (5)$$

де y – кодування значення шорсткості поверхні;
 x_1, x_2, x_3 – кодування значення факторів подачі, глибини різання та швидкості різання.

Справедливість залежності шорсткості поверхні від режимів різання можна встановити перевіркою адекватності лінійної частини полінома (5) [11-15].

Проведено дослідження шорсткості поверхні деталі зі сталі 38ХМ при обробці інструментальною державкою PCLNR 2020 K12 із різальною пластиною з твердого сплаву та покриттям TiCN+Al₂O₃+TiN (головний кут у плані 95°, радіус при вершині 0,4 мм).

Рівні факторів та їх кодування наведені в табл. 1. Кодовані значення факторів x_1 , x_2 , x_3 при натуральних значеннях логарифма дорівнюють одиниці на верхньому рівні, нулю на основному рівні та мінус одиниці на нижньому рівні. Це обумовлено рівнянням (3), яке для кожного з факторів набуде відповідного вигляду:

$$x_1 = \frac{2(\ln s - \ln 0,34)}{\ln 0,34 - \ln 0,07} + 1, \quad x_2 = \frac{2(\ln t - \ln 2)}{\ln 2 - \ln 1} + 1, \quad x_3 = \frac{2(\ln v - \ln 140)}{\ln 140 - \ln 80} + 1. \quad (6)$$

Таблиця 1 – Рівні факторів

Фактори	Кодоване значення	Натуральні рівні факторів відповідно до кодування		
		верхній (+1)	основний (0)	нижній (-1)
Подача, s , мм/об	x_1	0,34	0,205	0,07
Глибина різання, t , мм	x_2	2	1,5	1
Швидкість різання v , м/хв	x_3	140	110	80

Джерело: розроблено авторами.

Оцінювання коефіцієнтів рівняння (5) виконуємо за методикою повного факторного дослідження типу 2³. Складемо матрицю планування з результатами дослідження (табл. 2).

Таблиця 2 – Матриця планування дослідження та результати дослідження

Номер досліджу	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1	y_2	y_3	$Y_{сеп}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	3,61	4,30	3,75	3,89
2	+	-	+	-	-	+	-	+	3,96	4,80	4,30	4,35
3	+	+	-	-	-	-	+	+	5,28	6,00	5,60	5,63
4	+	+	+	-	+	-	-	-	5,98	5,80	6,15	5,98
5	+	-	-	+	+	-	-	+	2,79	3,20	3,00	3,00
6	+	-	+	+	-	-	+	-	3,08	3,15	3,50	3,24
7	+	+	-	+	-	+	-	-	3,61	3,50	4,00	3,70
8	+	+	+	+	+	+	+	+	3,66	4,00	3,70	3,79

Джерело: розроблено авторами.

Визначаємо коефіцієнти рівняння регресії (5) та складаємо таблицю для визначення коефіцієнтів лінійного рівняння (табл. 3).

Таблиця 3 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння

Номер досліджу	b_0	b_1	b_2	b_3	b_1b_2	b_1b_3	b_2b_3	$b_1b_2b_3$
1	3,89	-3,89	-3,89	-3,89	3,89	3,89	3,89	-3,89
2	4,35	-4,35	4,35	-4,35	-4,35	4,35	-4,35	4,35
3	5,63	5,63	-5,63	-5,63	-5,63	-5,63	5,63	5,63
4	5,98	5,98	5,98	-5,98	5,98	-5,98	-5,98	-5,98
5	3,00	-3,00	-3,00	3,00	3,00	-3,00	-3,00	3,00
6	3,24	-3,24	3,24	3,24	-3,24	-3,24	3,24	-3,24
7	3,70	3,70	-3,70	3,70	-3,70	3,70	-3,70	-3,70
8	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79	3,79
Середнє значення	4,2	0,58	0,14	-0,76	-0,04	-0,26	-0,06	-0,01

Джерело: розроблено авторами.

Після обробки результатів дослідження отримаємо рівняння

$$y = 4,2 + 0,58x_1 + 0,14x_2 - 0,76x_3 - 0,04x_1x_2 - 0,26x_1x_3 - 0,06x_2x_3 - 0,01x_1x_2x_3. \quad (7)$$

Виконуємо перевірку адекватності та однорідності рівняння (7) і визначаємо довірчий інтервал коефіцієнтів регресії. Після виключення незначущих коефіцієнтів рівняння (7) остаточно приймає вигляд

$$y = 4,2 + 0,58x_1 + 0,14x_2 - 0,76x_3 - 0,26x_1x_3. \quad (8)$$

Перевірку адекватності рівняння (8) виконано за F -критерієм Фішера. Визначено, що лінійна модель є адекватною. Таким чином, залежність шорсткості поверхні від факторів, що досліджуються, з достатньою точністю може бути представлена рівнянням (3).

Для переходу від кодованих значень факторів до натуральних значень у рівняння (8) необхідно підставити значення факторів x_1, x_2, x_3 – вирази (6). Виконуючи потенціювання отримаємо:

$$Ra = 6,14 \cdot 10^{10} s^{5,59-1,04 \ln v} t^{0,41} v^{-4,66} . \quad (9)$$

Рівняння (9) описує залежність шорсткості поверхні від режимів різання при обточуванні сталі 38ХМ. Отримане рівняння дозволяє побудувати номограми, які можна використовувати у практичних цілях для визначення шорсткості поверхні при обраних значеннях режимів різання.

За отриманим виразом виконано математичне моделювання залежності шорсткості поверхні від режимів різання. Аналіз залежності шорсткості поверхні від подачі (рис. 1) показує, що зменшення подачі призводить до зменшення шорсткості. Зокрема, зменшення подачі з 0,34 мм/об до 0,1 мм/об призводить до зменшення шорсткості поверхні на величину до 65 %. Також показано, що збільшення глибини різання призводить до збільшення шорсткості поверхні на 25 %.

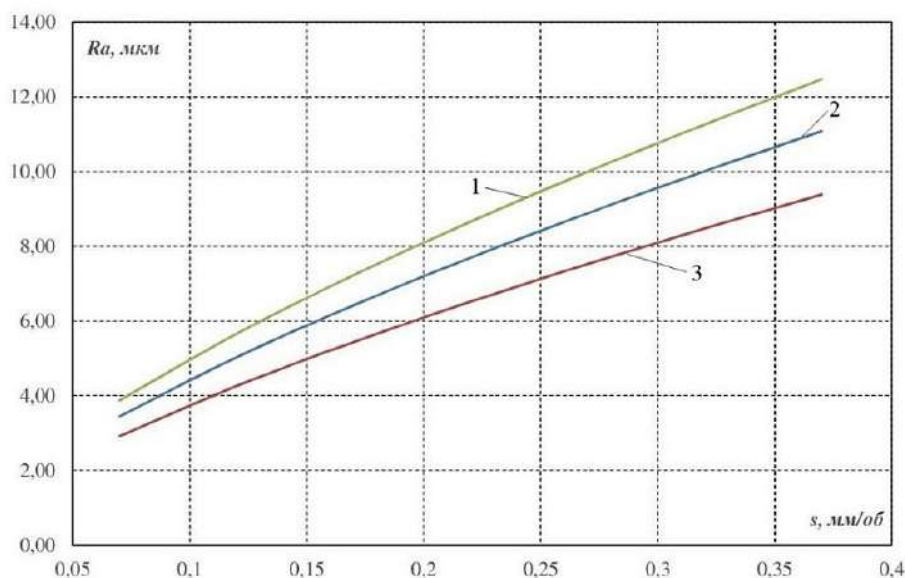


Рис. 1. Залежність шорсткості поверхні від подачі (швидкість різання $v = 110$ м/хв):

1 – глибина різання $t = 2$ мм; 2 – глибина різання $t = 1,5$ мм;

3 – глибина різання $t = 1$ мм

Джерело: розроблено авторами.

Збільшення глибини різання призводить до збільшення шорсткості поверхні (рис. 2). Але цей параметр має на шорсткість поверхні меншій вплив, ніж величина подачі. Так, при збільшенні величини припуску з 1 мм до 2 мм, шорсткість зростає на 25 % при постійній швидкості різання та подачі. У цьому випадку значення отриманої шорсткості поверхні належать до одного класу. Одночасна зміна глибини різання та величини подачі призводить до зміни шорсткості поверхні на величину до 50 %.

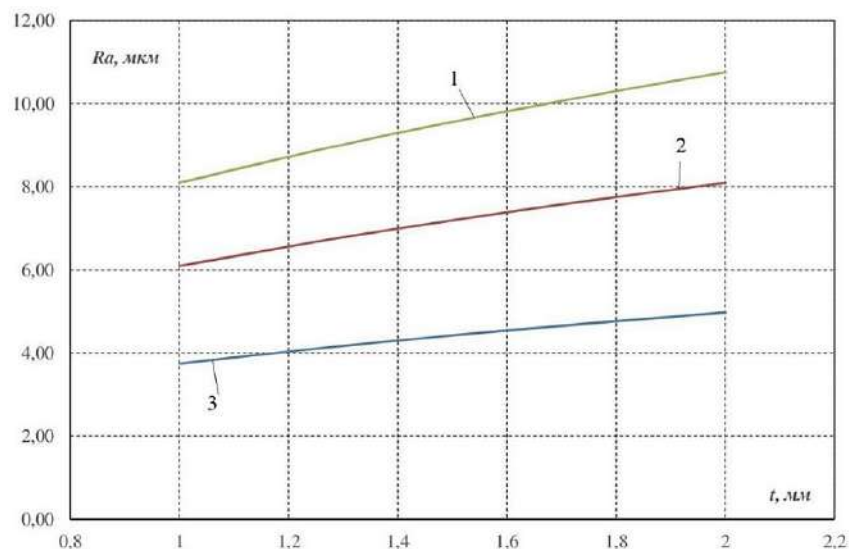


Рис. 2. Залежність шорсткості поверхні від глибини різання (швидкість різання $v = 110 \text{ м/хв}$):

1 – подача $s = 0,3 \text{ мм/об}$; 2 – подача $s = 0,2 \text{ мм/об}$; 3 – подача $s = 0,1 \text{ мм/об}$.

Джерело: розроблено авторами.

Обробка на більш високих швидкостях різання призводить до зменшення шорсткості поверхні (рис. 3). Зокрема, збільшення швидкості різання з 80 м/хв до 140 м/хв призводить до зменшення шорсткості поверхні на величину до 70 %. Подібний результат обумовлений тим, що швидкість різання та подача є взаємозалежними факторами.

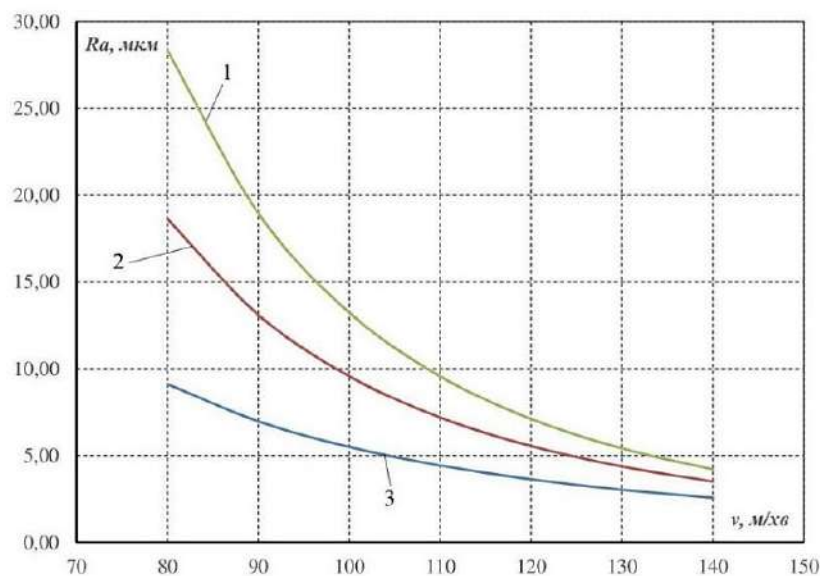


Рис. 3. Залежність шорсткості поверхні від швидкості різання (глибина різання $t = 1,5 \text{ мм}$):

1 – подача $s = 0,3 \text{ мм/об}$; 2 – подача $s = 0,2 \text{ мм/об}$; 3 – подача $s = 0,1 \text{ мм/об}$.

Джерело: розроблено авторами.

Проведене авторами дослідження залежності шорсткості поверхні від режимів різання свідчить, що подача та швидкість різання суттєво впливають на шорсткість поверхні; глибина різання має незначний вплив на шорсткість поверхні. Отримані результати співвідносяться з дослідженнями для інших матеріалів [7-9].

Отже, найбільш доцільно проводити обточування деталей зі сталі 38ХМ на малих глибинах різання, на малих подачах та великих швидкостях різання. Малі глибини різання та подачі призводять до збільшення основного часу обробки, але збільшення швидкості різання дозволяє зменшити основний час. Встановлення оптимальних параметрів обробки дозволить отримати оптимальні значення шорсткості поверхні та зменшити основний час.

Пошук оптимальних режимів різання виконаємо за допомогою методу Тагучі. Цей метод широко застосовується для оцінки якості виробів. В основі методу Тагучі лежить пошук технологічних режимів, при яких відклик (параметр якості, який оцінюється) найменше змінюється під дією шумів – факторів, що не контролюються. Таку стійкість та здатність демпфувати шуми називають робастністю. Відповідно до методу Тагучі, при обробці результатів багатофакторного експерименту поряд зі звичайними відхиленнями відклику у кожному експерименті вимірюється показник, який визначається співвідношенням сигнал/шум (S/N). Вказане співвідношення є мірою розкиду відклику для факторів, що контролюються, при варіюванні факторів, які не контролюються [14, 15]

Існує три типи співвідношення сигнал/шум, які визначаються залежно від того, яке задане значення відклику є оптимальним: якомога менше, якомога більше або деяке кінцеве.

Для забезпечення найменшої шорсткості поверхні необхідно застосувати співвідношення сигнал/шум «якомога менше», яке визначають за виразом [14; 15]:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_1^n y_i^2 \right). \quad (10)$$

Результати проведеного експерименту і визначення співвідношення сигнал/шум (S/N) поєднуємо в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати дослідження та співвідношення сигнал/шум

Номер досліджу	s , мм/об	t , мм	v , м/хв	y_1 , мкм	y_2 , мкм	y_3 , мкм	S/N
1	0,07	1	80	3,61	4,30	3,75	-11,82
2	0,07	1	140	3,96	4,80	4,30	-12,80
3	0,34	2	80	5,28	6,00	5,60	-15,02
4	0,34	2	140	5,98	5,80	6,15	-15,53
5	0,07	1	80	2,79	3,20	3,00	-9,55
6	0,07	1	140	3,08	3,15	3,50	-10,23
7	0,34	2	80	3,61	3,50	4,00	-11,39
8	0,34	2	140	3,66	4,00	3,70	-11,57

Джерело: розроблено авторами.

Визначення похибки для кожного рівня досліджень виконуємо за виразом

$$\Delta = S/N_{\max} - S/N_{\min}. \quad (11)$$

Середнє співвідношення сигнал/шум на кожному рівні параметрів різання отримано шляхом усереднення на відповідних рівнях. Наприклад: середнє співвідношення сигнал/шум для швидкості різання v на нижньому рівні розраховано шляхом усереднення співвідношення сигнал/шум для експериментальних серій 1, 2 та 3 відповідно. Аналогічно визначаємо середнє співвідношення сигнал/шум для кожного рівня (табл. 5).

Таблиця 5 – Середнє відношення «сигнал/шум»

Рівень	s , мм/об	t , мм	v , м/хв
Нижній	-11,1	-11,1	-11,94
Верхній	-13,38	-13,38	-12,53
Δ	2,27	2,27	0,6
Ранг	1	2	3

Джерело: розроблено авторами.

Незалежно від типу експлуатаційної характеристики, високе значення співвідношення сигнал/шум свідчить, що досліджувана характеристика близька до хорошої якості. Отже, бажано орієнтуватися на більш високе значення співвідношення сигнал/шум (рис. 4).

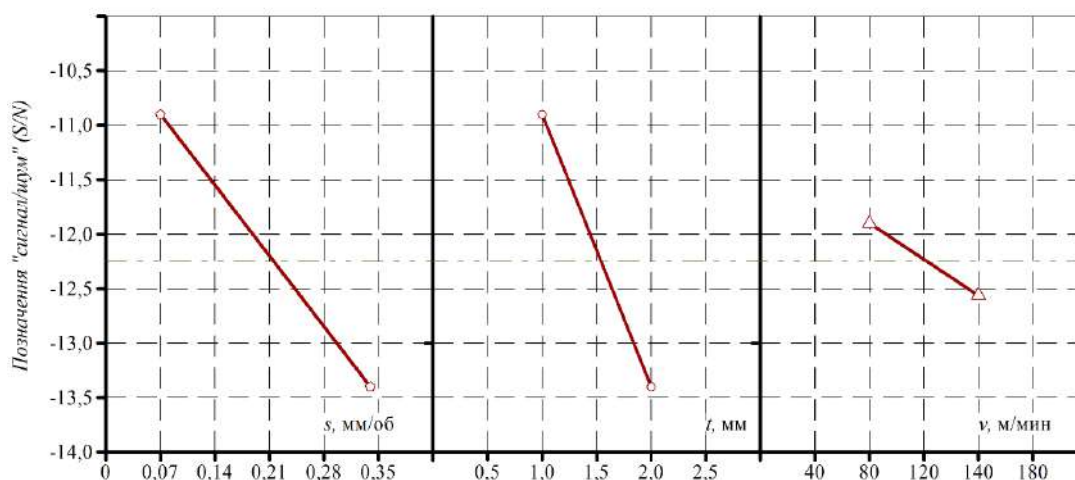


Рис. 4. Ділянка основних ефектів для коефіцієнтів сигнал/шум (S/N)

Джерело: розроблено авторами.

Оптимальні параметри режимів різання (подача – нижній рівень – $s = 0,07$ мм/об; глибина різання – нижній рівень – $t = 1$ мм; швидкість різання – нижній рівень – $v = 80$ м/хв) при обточуванні сталі 38ХМ, визначені за методом Тагучі, дозволяють отримати оптимальні параметри шорсткості поверхні.

Висновки. У роботі запропоновано залежність шорсткості поверхні від режимів різання (подачі, швидкості та глибини різання), яка представлена рівнянням регресії у ступеневому вигляді. Виконано планування факторного експерименту типу 2^3 . Встановлено адекватність використання рівняння у ступеневому вигляді для аналізу шорсткості поверхні. Визначено залежність шорсткості поверхні від режимів різання при обточуванні сталі 38ХМ. Встановлено, що суттєво на шорсткість поверхні впливають подача та швидкість різання, глибина різання чинить незначний вплив на шорсткість поверхні. Доведена доцільність обточування деталей зі сталі 38ХМ на малих глибинах різання, на малих подачах та великих швидкостях різання. За допомогою методу Тагучі визначені оптимальні параметри режимів різання для відповідних умов обробки ($s = 0,07$ мм/об; $t = 1$ мм; $v = 80$ м/хв). Показана ефективність доповнення методу повного факторного дослідження методом Тагучі.

Список використаних джерел

1. Graham, T. S. Cutting Tool Technology: Industrial Handbook / T. S. Graham. – London : Springer-Verlag, 2008. – 600 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-205-0>.
2. Klocke, F. Manufacturing Processes 1. Cutting / F. Klocke. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. – 506 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8>.
3. Liang, S. Analysis of Machining and Machine Tools / S. Liang, A.J. Shih. – New York : Springer, 2016. – 203 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7645-1>.
4. Shaw, M. C. Metal Cutting Principles / M. C. Shaw. – 2nd ed. – New York : Oxford University Press, 2005. – 651 p.
5. Mgherony, A. Comparison of Surface Roughness When Turning and Milling / A. Mgherony, B. Mikó, G. Farkas // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. – 2021. – № 65(4). – P. 337-344. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPme.17898>.
6. Optimization of machining parameters for turning operation with multiple quality characteristics using Grey relational analysis / F. Puh, Z. Jurković, M. Perinić, M. Brezocnik, S. Buljan // Tehnicki Vjesnik-technical Gazette. – 2016. – № 23. – P. 377-382. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20150526131717>

7. Taguchi Robust Design for Optimizing Surface Roughness of Turned AISI 1045 Steel Considering the Tool Nose Radius and Coolant as Noise Factors / A. T. Abbas, A. E. Ragab, F. Benyahia, M. S. Soliman // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2018. – P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/2560253>.
8. Optimization of Surface Quality and Power Consumption in Machining Hardened AISI 4340 Steel / D. Ochengo, L. Liang, Z. Wei, H. Ning // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/2675003>.
9. Şahin, E. Statistical and Experimental Investigation of Hardened AISI H11 Steel in CNC Turning with Alternative Measurement Methods / E. Şahin, İ. Esen // *Advances in Materials Science and Engineering* – 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9480303>
10. Tanikić, D. Modelling and optimization of the surface roughness in the dry turning of the cold rolled alloyed steel using regression analysis / D. Tanikić, V. Marinković // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2012. – № 34 (1). DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782012000100006>.
11. Dean, A. *Design and Analysis of Experiments* / A. Dean, D. Voss, D. Draguljić. – Cham (Switzerland) : Springer, 2017. – 840 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>.
12. Antony, J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists* / J. Antony. – Elsevier, 2014. – 208 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-03558-2>.
13. Taguchi, G. *Taguchi's quality engineering handbook* / G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu. – New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004. – 1662 p.
14. Pinedo, M. L. *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services* / M. L. Pinedo. – New York : Springer-Verlag, 2009. – 536 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0910-7>.

References

1. Graham, T. S. (2008). *Cutting Tool Technology*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-205-0>.
2. Klocke, F. (2011). *Manufacturing Processes 1*. Springer Berlin Heidelberg <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8>.
3. Liang, S., & Shih, A.J. (2016). *Analysis of Machining and Machine Tools*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7645-1>.
4. Shaw, M. C. (2004). *Metal Cutting Principles (Oxford Series on Advanced Manufacturing)*. Oxford University Press, USA.
5. Mgherony, A., Mikó, B., & Farkas, G. (2021). Comparison of Surface Roughness When Turning and Milling. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.3311/ppme.17898>.
6. Puh, F., Jurković, Z., Perinić, M., Brezocnik, M., & Buljan, S. (2016). Optimization of machining parameters for turning operation with multiple quality characteristics using Grey relational analysis. *Tehnicki vjesnik-Technical Gazette*, 23(2). <https://doi.org/10.17559/tv-20150526131717>.
7. Abbas, A. T., Ragab, A. E., Benyahia, F., & Soliman, M. S. (2018). Taguchi Robust Design for Optimizing Surface Roughness of Turned AISI 1045 Steel Considering the Tool Nose Radius and Coolant as Noise Factors. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2018/2560253>.
8. Ochengo, D., Liang, L., Wei, Z., & Ning, H. (2022). Optimization of Surface Quality and Power Consumption in Machining Hardened AISI 4340 Steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/2675003>.
9. Şahin, E., & Esen, İ. (2021). Statistical and Experimental Investigation of Hardened AISI H11 Steel in CNC Turning with Alternative Measurement Methods. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2021/9480303>.
10. Tanikić, D. & Marinković, V. (2012). Modelling and optimization of the surface roughness in the dry turning of the cold rolled alloyed steel using regression analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34(1). <https://doi.org/10.1590/S1678-58782012000100006>
11. Dean, A., Voss, D., & Draguljić, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>.
12. Jiju Antony (2014) *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2012-0-03558-2>.

13. Taguchi, G., Chowdhury, S. & Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

14. Pinedo, M. L. (2009). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0910-7>.

Отримано 26.02.2024

UDC 621.91.01

Yurii Yarovyi¹, Volodymyr Frolov², Serhii Sapon³, Iryna Isaienko⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Digital Technologies in Engineering
Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

E-mail: yarovoy.u.v@op.edu.ua, **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-6997-4108>, **ResearcherID:** [KBB-1945-2024](https://orcid.org/0000-0002-6997-4108)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

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

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Wood Technology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: s.sapon@gmail.com, **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>, **ResearcherID:** [G-7764-2014](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

⁴master

Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

E-mail: elisdechart@gmail.com

STUDY OF SURFACE ROUGHNESS IN TURNING OF CHROMIUM-MOLYBDENUM STEEL

Surface roughness is one of the parameters of product quality, that's why the research of cutting mode impact on surface roughness is a current topic. The diversity of cutting tools and materials to be worked leads to the need for more detailed study of the impact of cutting modes on surface roughness.

Previous researches have established that the radius of curvature of cutting tool and the cutter feed have an impact on surface roughness. There are also studies for assessing cutting speed and cutting depth effects on surface roughness. But these studies are not complete and exhaustive, because they have been done for selected materials, cutting tools and cutting modes.

The aim of the research described in the article is a scientific inquiry of cutting mode impact on surface roughness in turning of chromium-molybdenum steel 38XM and the search for optimal cutting modes for this steel.

The mathematical relationship between surface roughness and cutter feed, cutting depth, cutting speed was written in the form of power function. The range of variation was chosen. Regression coefficients were defined on the methodology of full factor experiment of type 23. The constructed mathematical model has been checked for adequacy. The equation of surface roughness dependence on cutting mode in turning of 38XM steel was obtained.

Finding the best possible combinations of cutter feed, cutting depth, cutting speed values for turning of 38XM steel was undertaken using the Taguchi method. It was based on the search for technological modes in which the evaluated quality parameter is least affected by uncontrolled factors.

As a result of the research it is established that cutting speed and cutting feed have the greatest impact on surface roughness. It is also shown that cutting depth has a negligible impact on surface roughness. It is proved that the machining processed at small cutting depth and small feed and large cutting speed is most appropriate. The optimal cutting modes for turning, providing minimal surface roughness are determined.

Thus, the complex use of full factor experiment method and the Taguchi method made it possible not only to obtain the equation for the dependence, but also to determine optimal cutting modes.

Keywords: surface roughness; cutting speed; cutting feed; cutting depth; design of experiment; Taguchi method.

Fig.: 4. Tabl.:5. References: 14.

Олександр Степура¹, Павло Кондрашев²¹старший викладач кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: oleksandrstepura@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1915-9057>. **ResearcherID:** [M-6873-2018](https://orcid.org/0000-0003-1915-9057)²кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: kondrashev@ukr.net **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7428-710X>. **ResearcherID:** [AAK-5011-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-710X)**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ
МЕДИЧНОГО ЕНДОПРОТЕЗА (СТЕНТА)**

При проектуванні технологічних процесів перед розробниками завжди стоять задачі, спрямовані на підвищення ефективності реалізації процесу лазерного різання трубчастих заготовок, а також вдосконалення технологічного оснащення. Основні зусилля направлені на пошук підвищення якісних показників зокрема шорсткості поверхні різку, а також пружних характеристик медичних ендопротезів. Мета – підвищення пружних характеристик медичного ендопротезу зокрема його гнучкості за рахунок зменшення ширини різку, а також оптимізація технологічного процесу лазерного різання трубчастої тонкостінної заготовки.

У цій роботі було розроблено оптимальну конфігурацію дослідного прототипу експериментального обладнання для виготовлення медичних ендопротезів (стеннів). Також була розроблена методика та проведена оптимізація параметрів керування процесом лазерного різання трубчастих заготовок. Результати експериментальних досліджень показали можливість зменшити ширину лазерного різку що дало змогу покращити пружні характеристики медичного ендопротезу.

Ключові слова: лазерне різання; медичний ендопротез; лазер; візерунок.

Табл.: 1. Рис.: 4. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Організм людини з віком стикається з багатьма небезпечними хворобами серед них атеросклероз, захворювання серцево-судинної системи, тромбофлебіт та інших важливих органів та систем життєдіяльності організму. Як свідчать дослідження вчених медичної галузі, це викликано негативними наслідками дії холестерину. Саме він утворює в судинах холестеринові бляшки, тобто закупорювання і перешкоджання вільному кровотоку у кровоносній системі. Вирішення цієї проблеми запропонували фахівці сучасної інженерії за допомогою виготовлення медичного ендопротеза (стенну). Стент являє собою металеву трубку, що має складний схожий на сітчастий візерунок, який дає можливість отримати необхідну гнучкість. Виготовлення цього візерунку можливо за допомогою процесу лазерного фрезерування. Оскільки лазерний промінь дає унікальні можливості для отримання візерунків будь-якої складності це досягається насамперед відсутністю контактних явищ у зоні обробки, а також універсальністю та гнучкістю лазерного променя як інструменту. Тому пошук різноманітних методів та підходів, спрямованих на вдосконалення технологічних процесів та обладнання для цих технологій, безумовно, є актуальним завданням, яку ставить перед науковою спільнотою сучасна кон'юнктура ринку сучасних технологій.

Постановка проблеми. Як було зазначено вище, важливою характеристикою ендопротезу є власне його візерунок саме він надає йому комплекс необхідних властивостей серед яких гнучкість, жорсткість, адаптивність та ін. [1-6]. Саме ці критично важливі характеристики стента дають можливість значною мірою знизити ризик смертельного травмування пацієнта під час імплантації та подальшої експлуатації ендопротеза. Для виготовлення цих візерунків застосовується декілька базових технологічних процесів зокрема: механічна обробка, електроерозійна, але ці технологічні процеси не здатні повною мірою забезпечити необхідну точність та ажурність (складність геометрії візерунка) стента. Саме тому оптимальні характеристики медичного ендопротеза вдається отримати за допомогою використання лазерної технології, зокрема прямого лазерного різання [7]. Для цього застосовуються волоконні лазери, лазери на алюмо-інтрієвому гранаті з модульованою добротністю, фемпто-лазери та ін. [7].

© Олександр Степура, Павло Кондрашев, 2024

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На підставі апріорної інформації виготовлення стента є достатньо складною технологічною операцією та процесом, який має декілька базових етапів реалізації, зокрема: проєктування оптимальної геометричної конфігурації візерунка ендопротеза з подальшою перевіркою його працездатності для цього здебільшого застосовують різноманітні розрахунки на міцність, де обов'язково враховується матеріал, геометричні характеристики заготовки (діаметр та довжина трубки). Наступний етап – це лазерне різання заготовки; потім фінішна обробка, це переважно або ультразвукове очищення, або електрохімічне полірування [8]. Також заключний етап виготовлення стента передбачає нанесення на його поверхню спеціальних лікарських препаратів необхідних для швидкого розчинення халестиринових бляшок на ушкодженій судині. Роботи [1; 2] демонструють зображення базових геометричних конфігурацій візерунків ендопротезів (рис. 1).

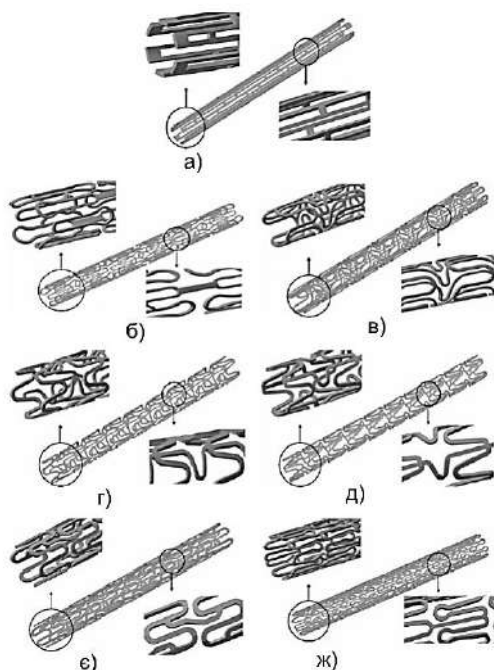


Рис. 1 Базові конструкції стентів [1]:

а – Palmaz-Schatz PS153 стент; б – Tenax стент; в – MAC Standard стент; г – MAC Q23 стент; д – MAC Plus стент; е) Coroflex стент; ж – RX Ultra Multi-link стент

На підставі аналізу літературних джерел [1-6] основні проблеми, які виникають під час лазерної обробки, це термічні напруження, що виникають унаслідок теплової дії лазерного променя на поверхню заготовки. Це продукує негативний ефект на характеристики стента, зокрема погіршення гнучкості ендопротеза, а це один з ключових пріоритетних моментів при імплантації і подальшої експлуатації ендопротеза. Проблема зменшення зони термічного впливу вирішується авторами робіт [1-3] за рахунок використання технологічного процесу лазерного фрезерування замість прямого лазерного різання. Це дає можливість зімітувати процес механічного фрезерування де матеріал знімається шар за шаром. Тобто в контексті лазерного фрезерування енергія лазерного випромінювання розподіляється порційно, що власне і призводить до зменшення зони термічного впливу і, як наслідок, зменшення термічних напружень і підвищення гнучкості ендопротеза.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У цій роботі запропоновано оптимальний з погляду оснащення експериментальний прототип технологічного обладнання для оптимізації технологічного процесу програмованого прецизійного різання трубчастій тонкостінної заготовки, яке дає змогу легко переналагоджувати основні параметри процесу керування, такі як швидкість, фокусна відстань тощо.

Метою статті є підвищення пружних характеристик медичного ендопротеза, зокрема його гнучкості за рахунок зменшення ширини різь, а також оптимізація технологічного процесу лазерного різання трубчастої тонкостінної заготовки.

Методика проведення досліджень. Враховуючи велику кількість технологічних схем реалізації процесу лазерного різання трубчастих тонкостінних заготовок для виготовлення медичних ендопротезів було розроблено експериментальне устаткування (рис. 2).

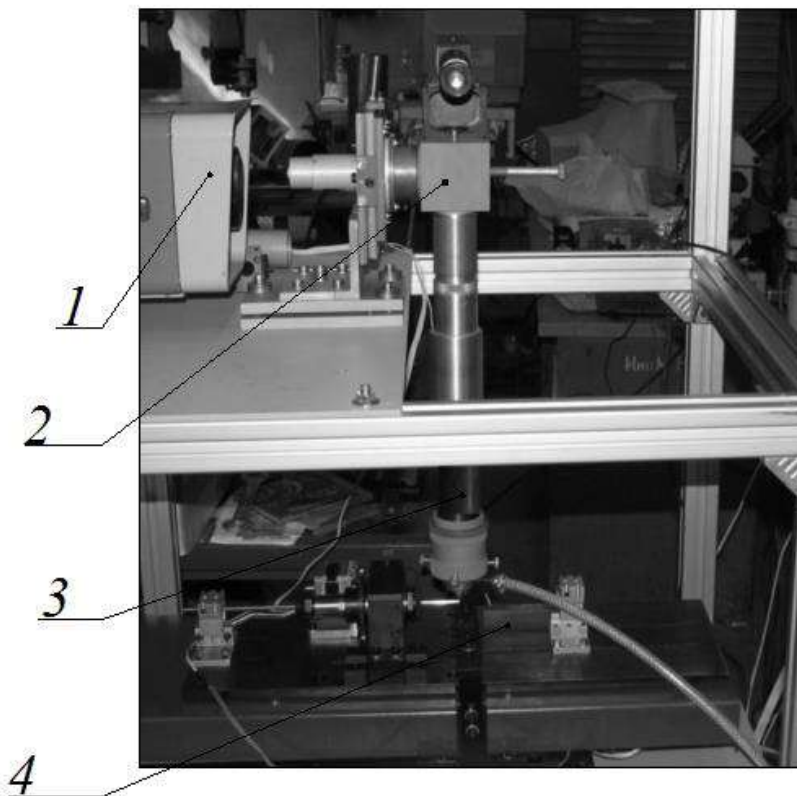


Рис. 2. Експериментальне устаткування для лазерної обробки медичних ендопротезів:
1 – випромінювач; 2-4* – кратна телескопічна система з поворотним дзеркалом та системою відеоконтролю; 3 – фокуруючий вузол із системою коаксимальної подачі робочого газу; 4 – робочий стіл з шпindelним вузлом та сервісним устаткуванням

До складу експериментального обладнання входить технологічний лазер на алюмоітрієвому гранаті (АІГ) потужністю 29 Вт, робочий стіл зі спеціальним сервісним устаткуванням, який включає в себе сервоприводи лінійного та обертального переміщення заготовки, системи захисту заготовки від деформації у вигляді люнетів, система фокусування з фокусною відстанню 30-100 мм, конструкція якої передбачає коаксимальну подачу робочого газу. Як робочий газ було використане стисле повітря, кисень, азот та ін. Як експериментальні зразки використовувались заготовки трубчастої форми з нержавіючої сталі 316L діаметром 1,8-5 мм і товщиною стінки 0,1 мм. Враховуючи багатогранність протікання фізичних процесів при реалізації технології лазерного різання безпосередньо для виготовлення геометрично складних візерунків в трубчастих тонкостінних заготовках, а також присутності процесів мікрорізання було використано методи математичної статистики [9]. Що дозволило адекватно оцінити вплив кожного технологічного фактору на процес лазерної обробки медичних ендопротезів. Опираючись на результати проведених раніше експериментів з відсіювання, було встановлено, що на продуктивність та якість лазерного різання стентів чинять суттєвий вплив такі технологічні фактори [10-12]:

- V_x – швидкість переміщення деталі (X_1);
- F – фокусна відстань об'єктива (X_2);

- γ – частота проходження імпульсів (X_3);
- ΔF – розмір розфокусування фокусувальної оптики (X_4);
- P_r – тиск робочого газу (X_5).

Результати проведених досліджень. Як функції відгуків було обрано ширину різку на поверхні (вхід), ширину різку на внутрішній частині ендопротеза (вихід). Активна стратегія проведення експериментальних досліджень була реалізована за допомогою симетричного композиційного плану другого порядку типу B_k , який має добрі статистичні характеристики [9]. Для кожної функції відгуку були побудовані квадратичні моделі процесу з використанням полінома (1) другого порядку [9].

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{i=k} b_i x_i + \sum_{i \leq j}^{i=k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{ii=1}^{i=k} b_{ii} x_i^2, \tag{1}$$

де k – кількість технологічних факторів;
 b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коефіцієнти полінома;
 i, j – індекси.

Трансформування технологічних факторів впливу на процес лазерного різання трубоччастих тонкостінних заготовок з натурального масштабу X_i до кодованого здійснювалося за допомогою залежностей (2).

$$X_i = X_{i0} + \Delta X_i x_i, \tag{2}$$

де X_{i0} – центр експерименту i -го технологічного фактору впливу в натуральному масштабі;
 X_i – i -ий технологічний фактор впливу в натуральному масштабі;
 ΔX_i – інтервал варіювання для i -го фактору впливу;
 x_i – i -ий фактор впливу.

Коефіцієнти полінома b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – моделі (1) розраховувалися за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення з використанням математичного апарату лінійної алгебри [9], залежність (3).

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y), \tag{3}$$

Гіпотеза стосовно адекватності отриманих математичних моделей ширини різку на поверхні (вхід), на внутрішній частині ендопротезу (вихід), проводилася за критерієм Фішера F [9]. Достовірність результатів експерименту за даним критерієм відповідає 5%-й похибці (4).

$$F_{розр.} \leq F_{табл.}, \tag{4}$$

де $F_{розр.}$ – розрахункове значення критерію Фішера [9];
 $F_{табл.}$ – табличне значення критерію Фішера [9].

Після проведення серії відсіюючих експериментів як було зазначено вище були визначені найбільш вагомі з погляду технологічного впливу на процес лазерного різання фактори та границі факторного простору (табл. 1).

Таблиця 1 – Рівні варіювання технологічних факторів

Рівні варіювання технологічних факторів	Незалежні змінні				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Розмірність	мм/хв	мм	кГц	мм	Атм.
Основний рівень	50	40	9	0	2
Інтервал варіювання	30	10	6	0,1	1
Верхній рівень	80	50	15	0,1	3
Нижній рівень	20	30	3	-0,1	1

Після розрахунку коефіцієнтів поліному залежність (1) були отримані математичні моделі функцій відгуків ширини різку на вході та виході візерунків стента. Графічна інтерпретація математичних моделей функцій відгуків наведена на рис. 3.

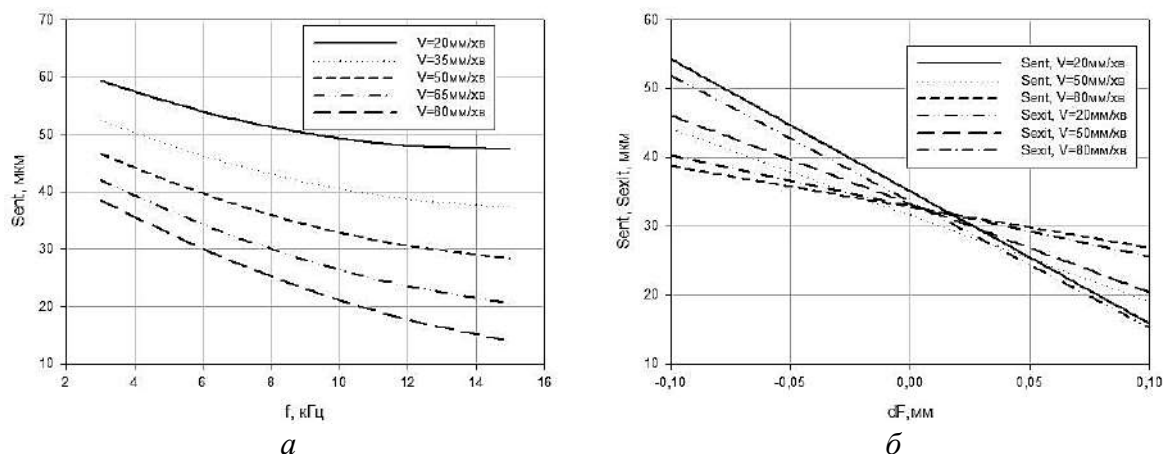


Рис. 3. Залежності ширини різку на вході S_{ent} від частоти слідування імпульсів f для різної швидкості обробки (а) та ширини різку вході та виході S_{ent} , S_{exit} від величини розфокусування (б):

а – фокусна відстань $F=30$ мм, величина розфокусування $\Delta F=-0,1$ мм, тиск робочого газу $P_r=1,01 \cdot 10^5$ Па; б – фокусна відстань $F=50$ мм, частота слідування імпульсів f 15 кГц, тиск робочого газу $P_r=3,04 \cdot 10^5$ Па

Аналізуючи графічну залежність (рис. 3, а), слід відзначити, що зменшення ширини різку відбувається у разі збільшення частоти слідування імпульсів це пояснюється передусім властивостями лазерів на АІГ з модульованою добротністю, це відбувається у разі зменшення потужності окремого імпульсу та відповідно збільшенні його тривалості при збільшенні частоти модуляції. Водночас зменшення ширини різку спостерігається також у разі збільшення швидкості обробки, внаслідок зменшення енергії сфокусованого лазерного променя. Також було встановлено, що змінюючи величину розфокусування оптичної системи, можна керувати формою лазерного різку, про що свідчить графічна залежність на рис. 3, б.

Також встановлено що при величині розфокусування оптичної системи приблизно 0,02 мм вдається отримати різ з мінімальною неперпендикулярністю стінок візерунка медичного ендопротеза. Також було визначено мінімально можливу ширину різку в досліджуваному факторному просторі яка дорівнює 14 мкм при максимальній швидкості обробки 80 мм/хв, фокусній відстані 30 мм, тиску робочого газу $1,01 \cdot 10^5$ Па. При дослідженні мікрошліфів в усіх точках експерименту зона термічного впливу по границях різку має звичайний вигляд ЗТВ аустенітної сталі після лазерної обробки (рис. 4). Слід відзначити, що зміну розмірів ЗТВ не було встановлено при зміні відстані між осями лазерного різку (змінювалась при проведенні експериментів у діапазоні від 1 до 0,12 мм. Порівнюючи результати лазерної обробки медичних ендопротезів сфокусованим лазерним променем з модульованою добротністю (рис. 4) та стентів лазерів на оптичному волокні [13] слід зазначити що в першому випадку ЗТВ є меншими, оскільки при обробці заготовки превалює механізм випаровування матеріалу із зони дії сфокусованого лазерного випромінювання, у той час коли використовується для подібної обробки лазер на оптичному волокні діє механізм звичайного газолазерного різання (з отриманням рідкої фази та з частковим її випаровуванням і відповідно видуванням рідкої фази за допомогою робочого газу).

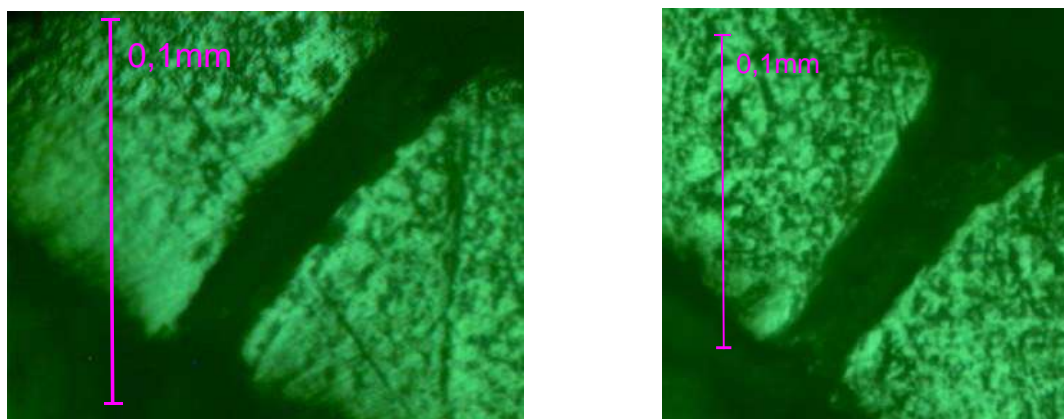


Рис. 4. Мікроаналіз структури поверхні лазерного різку трубчастої заготовки зі сталі 316L

Висновки. У результаті проведених досліджень було встановлено можливість використання запропонованої схеми обробки тонкостінних трубчастих заготовок імпульсним лазерним випромінюванням частота слідування імпульсів до 15 кГц, швидкістю лінійного різання 20-80 мм/хв.

Були отримані математичні моделі функцій відгуків ширини лазерного різку на вході та виході стента, які в подальшому можуть бути використані як визначення оптимальних параметрів режиму обробки, спрямованих на підтримку постійного рівня якості майбутніх виробів.

Підтверджена адекватність отриманих математичних моделей процесу лазерного різання трубчастих заготовок з тонколистового матеріалу і можливість використання їх при реалізації технології виготовлення медичних ендопротезів.

Список використаних джерел

1. Suggestion of Potential Stent Design Parameters to Reduce Restenosis Risk driven by Foreshortening or Dogboning due to Non-uniform Balloon-Stent Expansion / D. Lim, S.-K. Cho, W.-P. Park, A. Kristensson, J.-Y. Ko, S. T. S. Al-Hassani, H.-S. Kim // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2008. – Vol. 36, № 7. – Pp. 1118-1129.
2. Про створення скінченно-елементної моделі ендопротеза / К. М. Рудаков, М. І. Анякін, В. С. Коваленко, Ю. С. Коба // *Вісті Академії інженерних наук України*. – 2007. – № 4 (34). – С. 4-8.
3. MetriCath A new intracoronary measurement catheter compared to intravascular ultrasound and quantitative coronary angiography in a stented porcine coronary model // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. – 2002. – Vol. 57, № 9. – Pp. 2-9.
4. Coronary artery stents: identification and evaluation / J. Butany, K. Carmichael, S. W. Leong, M. J. Collins // *Clin Pathol*. – 2005. – № 58. – P. 795-804. doi:10.1136/jcp.2004.024174
5. Numerical Modeling of the Medical Stents, in a / K. Rudakov, I. Gaydukevich, I. Vahdatinya, M. Anyakin // *Proceeding of 4 International Conference on Laser Technology in Welding and Materials Processing (May 2009 Katsiveli, Ukraine)*. – Pp. 15-17.
6. Walke, W. Numerical analysis of three-layer vessel stent made from Cr-Ni-Mo steel and tantalumInt / W. Walke, Z. Paszenda, J. Jurkiewicz // *Computational Materials Science and Surface Engineering: in 2 v.* – 2007 – Vol. 1. № 1. – Pp. 137-140.
7. Stent Materials and Manufacturin: Requirements and Possibilities / A. Schuessler, M. Strobel, R. Steegmueller, M. Piper // *Opportunities in a Proceedings of the ASM Materials & Processes for Medical Devices (8-10 Sept. 2003 Anaheim, CA)*. – 2003 – P. 75-77.
8. Blackman, G. Small but beautifully formed / G. Blackman // *Laser systems Europe*. – 2015. – Is. 28, Autumn. – Pp. 16-18.
9. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – Москва : Наука, 1980. – 304 с.

10. Research on laser micromachining at medical stents manufacturing [Electronic resource] / V. Kovalenko, J. Meijer, J. Yao [at al.] // Proceedings of 16th International Symposium for Electromachining (ISEM-XVI). – Shanghai : People’s Republic of China. ISEM, 2010. – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/289552669_Research_on_laser_micromachining_at_medical_stents_manufacturing.

11. Some results of studying laser micromachining at medical stents manufacturing» / V. Kovalenko, M. Anyakin, R. Zhuk, [at al.] // International Journal of Nanomanufacturing (IJNM). – 2010. – Vol. 6, № 1-4. – Pp. 253-263.

12. Дослідження технології лазерної обробки стентів / В. Коваленко, М. Анякін, Р. Жук // Технологічні системи. – 2009. – № 46/2. – С. 36-46.

13. Gary, K. L. An Investigation into the Role of Melt Ejection in Repeatability of Entrance and Exit Hole Diameters in Laser Percussion Drilling [Electronic resource] / K. L. Gary Ng, Lin Li // Proceedings of International Congress “ICALEO’2001” (Oct. 15-18, 2001, Jacksonville, FL, USA). – Access mode: <https://pubs.aip.org/liacp/proceedings-abstract/ICALEO/2001/296/1075104>.

References

1. Dohyung Lim, Seung-Kwan Cho, Won-Pil Park, A. Kristensson, JAI-Young Ko, S. T. S. Al-Hassani, Han-Sung Kim. (2008). Suggestion of Potential Stent Design Parameters to Reduce Restenosis Risk driven by Foreshortening or Dogboning due to Non-uniform Balloon-Stent Expansion. *Annals of Biomedical Engineering*, 36(7), 1118–1129.

2. Rudakov, K.M. Anyakin, M.I., Kovalenko, V.S., Koba, Yu.S. (2007). Pro stvorennia skinchennoelementnoi modeli endoproteza [About the creation of a finite-element model of an endoprosthesis]. *News of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine – University of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine*, 4(34), 4-8.

3. van der Giessen, W. J., et al. (2002). MetriCath A new intracoronary measurement catheter compared to intravascular ultrasound and quantitative coronary angiography in a stented porcine coronary model. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, 57, 2–9.

4. Butany, J., Carmichael, K., Leong, S. W., Collins, M. J. (2005). Coronary artery stents: identification and evaluation. *Clin Pathol*, 58, 795-804. doi:10.1136/jcp.2004.024174.

5. Rudakov, K., Gaydukevich, I., Vahdatinya, I., Anyakin, M. (2009). Numerical Modeling of the Medical Stents. *Proceeding of 4 International Conference on Laser Technology in Welding and Materials Processing* (May 2009 Katsiveli, Ukraine) (pp. 15-17).

6. Walke, W., Paszenda, Z., Jurkiewicz, J. (2007). Numerical analysis of three-layer vessel stent made from Cr-Ni-Mo steel and tantalum. *Computational Materials Science and Surface Engineering*, 1(1), 137-140.

7. Schuessler, A., Strobel, M., Steegmueler, R., Piper, M. (2003). Stent Materials and Manufacturing: Requirements and Possibilities. Opportunities in a Proceedings of the ASM Materials & Processes for Medical Devices (8-10 Sept. 2003 Anaheim. CA). P. 75-77.

8. Blackman, G. (2015). Small but beautifully formed. *Laser systems Europe*, 28, 16-18.

9. Novik, F.S., Arsov, Ya. (1980). *Optymyzatsiia protsessov tekhnologii metallov metodamy planyrovaniia eksperymentov [Optimization of metal technology processes using experimental design methods]*. Nauka.

10. Kovalenko, V. S., at al. (2008). Research on laser micromachining at medical stents manufacturing». *Proceedings of 16th International Symposium for Electromachining* (ISEM-XVI). Shanghai. People’s Republic of China. ISEM.

11. Kovalenko, V., Aniakin, M., Zhuk, R. (2010). Some results of studying laser micromachining at medical stents manufacturing». *International Journal of Nanomanufacturing (IJNM)*, 6(1-4), 253–263.

12. Kovalenko, V., Aniakin, M., Zhuk, R. (2009). Doslidzhennia tekhnologii lazernoi obrobky stentiv [Study of technology of laser treatment of stents]. *Tekhnologichni systemy – Technological systems*, 46/2, 36-46.

13. Gary, K.L., Lin, Li. (2001). An Investigation into the Role of Melt Ejection in Repeatability of Entrance and Exit Hole Diameters in Laser Percussion Drilling. “Proceedings of International Congress “ICALEO’2001”, Oct. 15-18, 2001, Jacksonville, FL, USA.

Отримано 21.03.2024

Oleksandr Stepura¹, Pavlo Kondrashev²

¹senior teacher of the department of laser technology and physical and technical technologies
National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: oleksandrstepura@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1915-9057>. **ResearcherID:** [M-6873-2018](https://orcid.org/0000-0003-1915-9057)

²PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Laser Technology and Physical and Technical Technologies
National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: kondrashev@ukr.net **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7428-710X>. **ResearcherID:** [AAK-5011-2020](https://orcid.org/0000-0002-7428-710X)

**MODELING AND OPTIMIZATION OF THE LASER CUTTING PROCESS
OF A MEDICAL ENDOPROSTHESIS (STENT)**

When designing technological processes, developers always face tasks aimed at increasing the efficiency of the laser cutting process of tubular blanks, as well as improving technological equipment. The main efforts are aimed at improving the quality indicators, in particular the roughness of the cut surface, as well as the elastic characteristics of medical endoprostheses.

The analysis of scientists' research on laser processing of medical endoprostheses made it possible to determine the main priority directions of scientific research, namely the search for ways to improve experimental equipment and optimal control parameters of the technological process of laser processing of tubular thin-walled blanks.

The purpose of this is to increase the elastic characteristics of the medical endoprosthesis, in particular its flexibility due to the reduction of the width of the cut, as well as the optimization of the technological process of laser cutting of the tubular thin-walled blank.

On the basis of a priori information, methods and approaches were developed to improve technological equipment in order to increase the productivity and quality of manufacturing medical endoprostheses. Namely, a complex approach was developed to increase the elastic characteristics of the stent by reducing the width of the laser cut. In particular, the methods of mathematical statistics were used for the effective analysis of technological factors affecting the process of laser treatment of medical endoprostheses. Namely, mathematical models of the process of laser cutting of thin-walled tubular blanks were obtained.

In this work, the optimal configuration of the experimental prototype of experimental equipment for the manufacture of medical endoprostheses (stents) was developed. Also, a technique was developed and optimization of the control parameters of the process of laser cutting of tubular blanks was carried out. The results of experimental studies showed the possibility of reducing the width of the laser cut, which made it possible to improve the elastic characteristics of the medical endoprosthesis.

Keywords: laser cutting; medical endoprosthesis; laser; pattern.

Table: 1. **Fig.:** 4. **References:** 13.

Богдан Дзюман¹, Олексій Осипчук², Олександр Охріменко³¹аспірант кафедри технології машинобудування

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

E-mail: dzyumanbogdan@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-5928-4569>²аспірант кафедри технології машинобудування

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

E-mail: aleksei.osypchuk@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7865-9484>³доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування

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

E-mail: okhrimenko.oleksandr@iit.kpi.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>**ResearcherID:** [M-2462-2017](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987), **Scopus Author ID:** [57222590572](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987)**ОСОБЛИВОСТІ СВЕРДЛІННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ
ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ДЕФЕКТИ ОБРОБКИ**

У сучасному світі композитні матеріали стали більш затребуваними і пов'язано це, в першу чергу, з розвитком машинобудування та авіабудування. Більшість підприємств має за мету покращення технічних характеристик виробу, але зменшення затрат часу, фінансів та виробничих відходів. Підраховано, що заміна 40 % конструкцій з алюмінію на ВПКМ призводить до зниження 12 % ваги конструкції, що покращує характеристики виробу. Технології виготовлення деталей, вузлів та складальних одиниць з композитних матеріалів є досить затребуваними та активно розвиваються. Вони розуміють собою виготовлення отворів з хорошою точністю та якістю.

У статті запропоновані методи оцінки розширування при свердлінні. Було проаналізовано причини утворення такого виду деформації, та спосіб їх вирішення. Детальний аналіз розширування показав, що для правильної оцінки розширування важливо враховувати площу розширування на вході та виході інструменту та площі міжшарових тріщини, що виникають безпосередньо у зоні різання

Ключові слова: свердло; розширування; різальний інструмент; композитний матеріал; КМ; обробка; ВПКМ.

Табл.: 1. Рис.: 17. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Полягає у вивченні та аналізу особливостей композитних матеріалів, зокрема їх деформацію під час обробки різальним інструментом та оцінці ступеня пошкодження.

Композитні матеріали відіграють значну роль у сучасних галузях таких, як авіабудування та машинобудування. Їхніми перевагами є низька вага, висока міцність, жорсткість, низька теплопровідність.

Проте конструкції виготовлені з композитних матеріалів (далі – КМ) є досить чутливими до дефектів, таких як (розширування, непроклеї, міжшарові тріщини, сколи, витягування волокон). Розширування здебільшого утворюється під час механічної обробки КМ. Присутність такого дефекту суттєво знижує якість та міцність конструкції, що робить подальше її використання неможливим.

Таким чином аналіз, та виявлення дефектів під час їх обробки стає досить актуальним дослідженням для запобігання руйнуванню конструкцій з КМ та прогнозування їх ресурсу довговічності.

Постановка проблеми. Проаналізувати причини утворення розширування під час обробки КМ, методи запобігання таких деформації для подальшого дослідження. Побудова та визначення відношення таких факторів як вид пошкодження, його характеристика, оцінка розміру розширування та причини виникнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблему розширування розглядали такі вчені як С. С. Tsao, Н. Hocheng, Brandon C. Gegg., С. Steven Suh., Albert C.J.Luo, Faraz, Mehta, Davim, Tsao, Nagarajan та ін. Під час дослідження було виявлено, що зміна режимів різання та геометрії інструменту значно впливають на процес утворення розширування, що дозволяє забезпечити конструкцію від утворення такої деформації.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Головною проблемою при дослідженні процесу розширування є правильна оцінка розширування, що має враховувати усі фактори цього явища. Ця проблема є маловивчена та недосліджена в наукових працях. Крім цього, планується розглянути перспективу для подальшого дослідження, що має на меті вирішення проблеми підвищення якості оброблюваних конструкцій та деталей з КМ.

Метою статті. Аналіз процесу розшарування композитних матеріалів. Дослідити механізм виникнення та поширення розшарування у процесі механічної обробки. Крім цього проаналізувати схеми розшарування, що виникають при обробці різальним інструментом і оцінити розмір та область пошкодження що виникла у процесі обробки отвору.

Виклад основного матеріалу. Будова та характеристика вуглецевого полімерного композитного матеріалу (далі - ВПКМ).

Міцність композитних матеріалів, а саме ВПКМ залежить від багатьох факторів. Через високу анізотропію властивостей одним з них є напрямок прикладеної сили відносно напрямку шару волокон (рис. 1) [1]. Через це застосування ВПКМ при тривимірному навантаженні є недоцільним так, як відбувається зменшення міцності.

Істотний вплив на механічні властивості ВПКМ є температура. Як правило, зі збільшенням температури зменшуються механічні властивості матриці. Низька температура теж впливає на волокнистий наповнювач матриці, але не так вагомо.

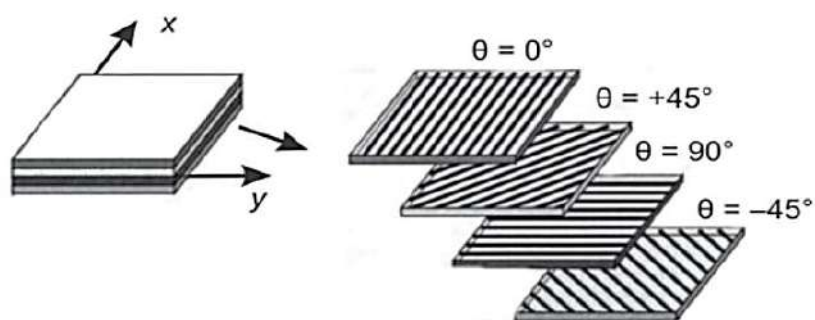


Рис. 1. Схема шарування матриці ВПКМ [1]

Питома міцності (границя міцності/густина) та жорсткість (модуль пружності/густина) ВПКМ більше чим у міцних аерокосмічних матеріалів, в тому числі і металів (рис.2)[1]. Це пояснює загребуваність таких композитних матеріалів як вуглепластик у порівнянні з іншими матеріалами.

Але у ВПКМ існують і недоліки, що виникають при їх обробці та експлуатації. Про основні з них буде наведено нижче.

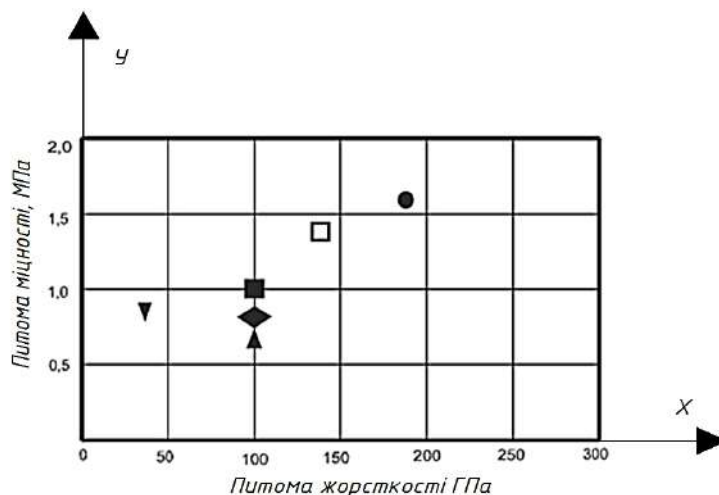


Рис. 2. Питома міцності жорсткість матеріалів [1]:

- ▼ - чавун;
- ◆ - сталь;
- ▲ - алюмінієвий сплав;
- - титановий сплав;
- - арамід;
- - вуглепластик

Поглинання вологи призводить до набухання матриці і знижує її механічні властивості. Крім того, набухання матриці запускає процес її теплового деформування при збільшенні температури. Деформація, яка виникла у результаті набухання може викликати вигини та кручення деталі з ВПКМ, що як наслідок вплине на експлуатаційні характеристики деталі. Під час циклів замерзання/відтаювання, поглинання вологи за рахунок циклічного збільшення об'єму (при замерзанні) і його зменшення (при відтаюванні), як правило, супроводжується тріщеноутворенням у матриці, що може призвести до розколу. При стрімкому підвищенні температури волога, що вбирається у матрицю, може перетворитись у пар, що може змінити (збільшити) напругу матриці. Утворювані внутрішні пари тиску можуть призвести до перевищення межі міцності ВПКМ та його розшаруванню.

Методи утворення отворів у композитних матеріалах ВПКМ.

Формування отворів для механічних з'єднань є одна з головних операцій у машинобудуванні та авіабудуванні. Для формування отворів у деталях можуть застосовуватись різні процеси, а саме: механічні різка, гідроабразивна різка, лазерна різка, електроерозійна різка. Однак специфічні складальні вузли значно звужують перелік можливих видів обробки, тому зупинимось на механічному процесі різання.

При обробці свердлінням, виникає осьова сила вздовж осі отвору, що при обробці ВПКМ викликає розшарування на вході та виході інструменту та утворення міжшарових тріщин. Тому одним із завдань у процесі свердління є зменшення осьової сили за рахунок модернізації геометрії різального інструменту (свердла) та визначенням оптимальних режимів різання.

Для підвищення стійкості інструменту застосовують нові інструментальні матеріали та покриття, вводять особливі вимоги до геометрії інструменту (округлення різальної кромки та форму робочих поверхонь).

Спіральне фрезерування - це альтернативний спосіб свердління отворів. У зарубжній літературі можна зустріти таку назву як «орбітальне свердління» (orbital drilling)[1]. Спіральне фрезерування являє собою фрезерування гвинтовою (спіральною) подачею. Пояснити таке фрезерування можна наступним чином: вісь обертання фрези зміщена відносно осі отвору, а сам інструмент відносно заготовки рухається по спіральній лінії. Завдяки такому руху кінематики у процесі спірального фрезерування виникають сили, які менші чим при звичайному свердлінні. Це забезпечує кращу якість отвору за рахунок зменшення розшарування, тому що стружка при таких рухах краще видаляється із зони різання та виключає пошкодження вже оброблених поверхонь. Також слід зазначити, що відсутність постійного контакту лез інструменту із заготовкою за принципом «різання – відпочинок», зменшує температуру та нагрів інструменту, і температуру що діє на заготовку, тому це теж покращує якість отвору та стійкість інструменту.

Аналіз деформацій та причини їх утворення.

Показники якості отворів у деталях з ВПКМ включають у себе такі показники: розмірна точність, погіршеність форми отвору, шорсткість та показники пошкодження обробленої поверхні.(розшарування, сколи кромки, витягування волокон, термічні деформації, розпушування, велика шорсткість, тріщини) (рис. 3, табл. 1). Характерним пошкодженням є міжшарові тріщини, через не дорізання шарів, що розшаровуються на вході інструменту не всі волокна зрізаються, якщо цих волокон мало, вони формують задирки, якщо їх багато, то відбувається розпушування волокон. Відомо що 60% браку деталей з композитних матеріалів при складанні літальних апаратів виникає через пошкодження отворів при їх обробці[1].

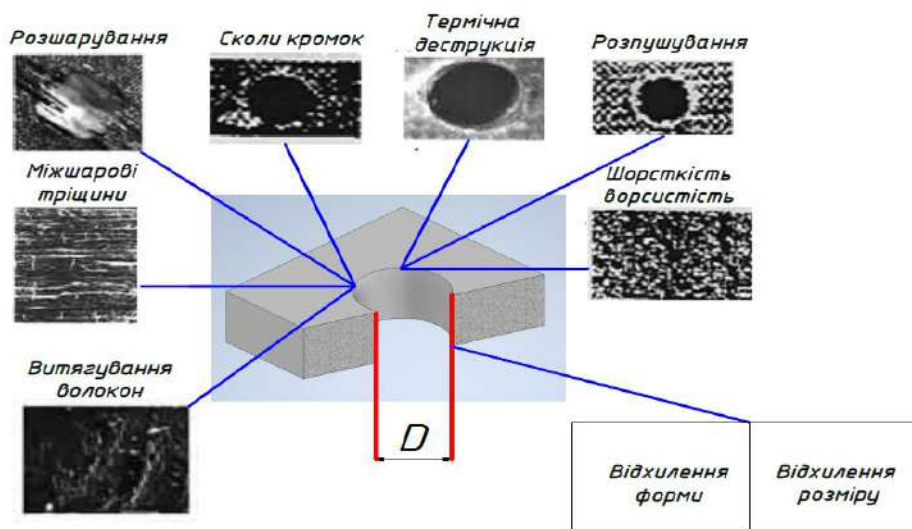


Рис. 3. Види деформацій отворів у композитних матеріалів з ВПКМ [1]

Табл. 1. Види та характеристика деформацій отворів деталей з ВПКМ [1]

Вид деформації	Характеристика деформації	Причина виникнення деформації
Розшарування зовнішніх шарів на поверхні врізання різального інструменту	Рівномірне утворення розшарування шарів поверхні врізання інструменту	Сила різання на перемишці та на стрічці інструменту більша чим міцність міжшарових з'єднань верхніх шарів заготовки
Розшарування зовнішніх шарів на поверхні виходу різального інструменту	Рівномірне утворення розшарування шарів поверхні на виході інструменту	Осьова сила різання, що діє на не зрізані шари ВПКМ, більше міцності міжшарових з'єднань нижніх шарів заготовки
Задирки	Частина волокон на виході інструменту з отвору залишається недорізаною	Недорізани нижні шари через їх деформацію та відслоювання нижнього шару
Міжшарові тріщини	Формуються тріщини між шарами ВПКМ у середині отвору	Осьова сила різання більше міцності міжшарових з'єднань
Витягування волокон	Витягування волокон з матриці	Мала адгезія волокон у матриці при данні осьові силі
Скол кромки	Мікроруйнування кромки отвору	Підвищена крихкість ВПКМ та вібрації при обробці
Термічна деструкція	Пошкодження поверхні отвору через підвищену температуру	Температура різання більше граничної ВПКМ (КМ)

Найбільш поширеною є деформація розшарування, що являє собою розділення поверхні шарів ВПКМ під дією осьових сил, що виникають у процесі різання. Цей вид деформації обумовлений тим, що вісь отвору, як правило, розміщується перпендикулярно площині волокон і діючій силі різання, що намагаються відірвати один шар від іншого.

Залежно від причин виникнення деформації можна спостерігати (розшарування зовнішніх шарів на поверхні врізання різального інструменту та розшарування зовнішніх шарів на поверхні виходу різального інструменту). Цей вид деформацій відрізняється від міжшарових тріщин тим, що формується винятково на поверхнях заготовки (рис. 4, 5, 6) [1; 2].

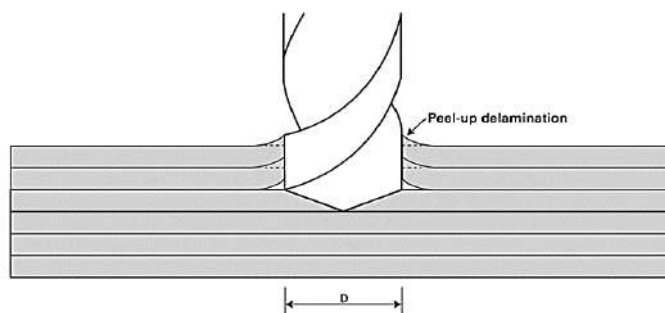


Рис. 4. Схема деформацій розшарування на вході інструменту [2]

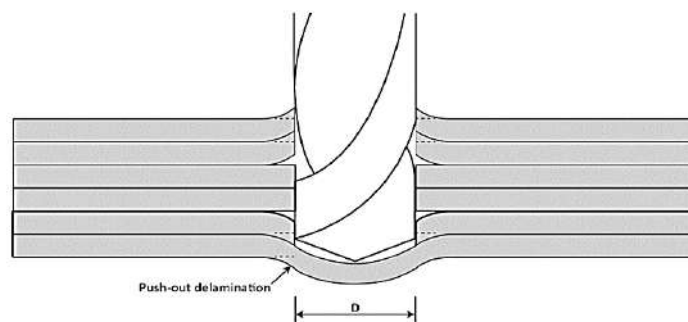


Рис. 5. Схема деформації розшарування на виході інструменту [2]

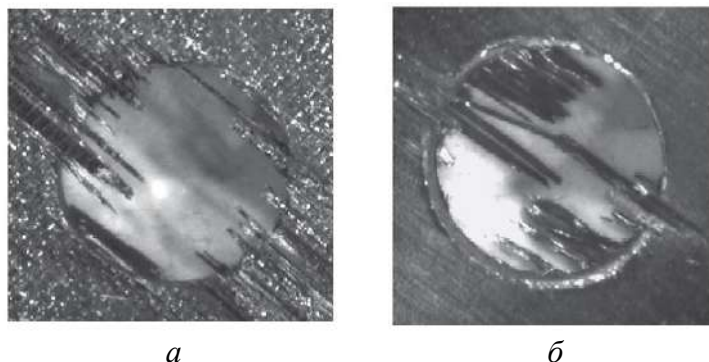


Рис. 6. Приклад розшарування зовнішніх шарів [1]:
а – при врізанні інструменту; б – при виході інструменту

До основних причин розшарування навіть при обробці «гострим» інструментом (свердлом) можна віднести: розшарування зовнішніх шарів на поверхні врізання – наявність від’ємних кутів на перемичці інструменту (свердло); розшарування зовнішніх шарів на поверхні виходу різального інструменту – велика подача.

Також розшарування зовнішніх шарів на поверхні врізання різального інструменту виникає внаслідок дій сили, що притискають верхні шари ВПКМ до робочих поверхонь свердла (рис. 4, 5, 6) [2]. Частина зрізаного матеріалу (стружка) накручується у стружко відвідний канал свердла та ущільнюється ще до того, як він буде повністю відділений від шару ВПКМ. У результаті чого в зоні його контакту, що формується та обробленою поверхнею виникає сила тертя, ця сила призводить до розшарування шарових зв’язків матриці. Отже, схильність до розшарування на поверхні врізання визначається властивостями матеріалу інструменту, режимами різання, конструкцією інструменту та силами різання.

Розшарування зовнішніх шарів на поверхні виходу інструменту виникає внаслідок – пошкодження міжшарових зонах нижніх шарів ВПКМ при виході інструменту з заготовки. Ця деформація характеризується наслідком дій осьової сили різання на ще не повністю розрізанні шари заготовки. Під дією осьової сили ще необроблені шари вигинаються, що призводить до порушень умов міцності між шарами матриці, формуючи та поширюючи тріщини у їх з’єднаннях та розриву адгезійного зв’язку, утворюючи розшарування. Експериментально доведено, що при свердлінні розшарування на поверхні врізання набагато менше, чим на поверхні виходу інструменту [13]. Область пошкодження навколо отвору на вході та виходу часто має еліптичну форму, при чому вісь цього еліпса орієнтується вздовж напрямлення волокон (рис. 7) [1]. Залежно від властивостей волокон оброблюваного ВПКМ та схеми матриці укладання (рис.1) [1]. Пошкодження можуть мати вигляд задирок або розпушування. Задирки являють собою окремі незрізані волокна, а розпушування – велике число незрізаних волокон по периметру отвору. Розпушування

виникає в області різання гострим кутом направлення волокон відносно різального інструменту, в умовах коли обробка виконується інструментом з збільшеним радіусом заокруглення різальної кромки (рис. 8) [2].

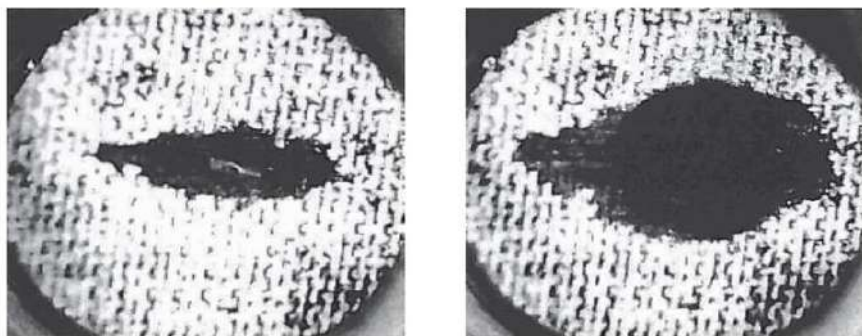


Рис. 7. Приклад розшарування (еліптичної форми) [1]

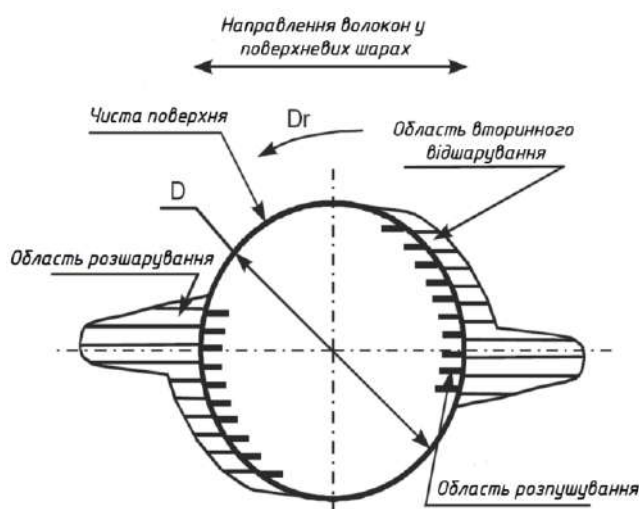


Рис. 8. Схема формування задирок та розпушування

Для кількісної характеристики розшарування використовують наступні коефіцієнти: Коефіцієнт розшарування Fd - являє собою відношення максимального діаметра пошкодженої області D_{max} до номінального діаметра отвору D (рис. 9) [3].

$$Fd = \frac{D_{max}}{D}, \tag{1}$$

де Fd – коефіцієнт розшарування;
 D_{max} – максимальний діаметр пошкодженої області;
 D – номінальний діаметр отвору.

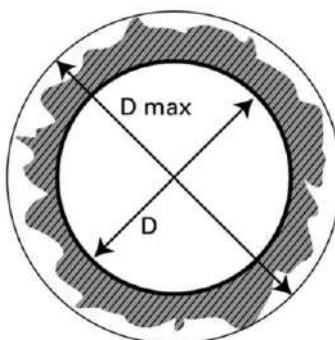


Рис. 9. Схема оцінки коефіцієнта розшарування [2]

Розмір розшарування (рис. 10)[4],[2]- представляє собою різницю між максимальним радіусом пошкодженої ділянки R_{max} і радіусом просвердленого отвору R

Формула для розрахунку розміру розшарування:

$$R_{max} - R = D_{роз} \tag{2}$$

де $D_{роз}$ – розмір розшарування;
 R_{max} – максимальний радіус пошкодження;
 R - радіус оброблюваного отвору.

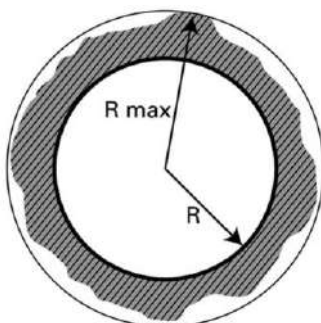


Рис. 10. Схема оцінки розміру розшарування [2]

Як зазначив Faraz A.[5] коефіцієнт Fd (рис. 9) [2], [5], може неповністю відобразити розшарування. Він пояснював це тим, що декілька розшарованих волокон можуть мати великий радіус із невеликою периферією отвору (рис. 11) [5]. Тому Faraz запропонував для повноти картини коефіцієнт двовимірного розшарування Fa , він дає більш чітку інформацію на розподіл розшарування навколо отвору.

Формула для розрахунку двовимірного розшарування:

$$Fa = \left(\frac{A_d}{A_{nom}} \right) \% \tag{3}$$

де Fa – коефіцієнт двовимірного розшарування;
 A_d - область пошкодження;
 A_{nom} – номінальна площа свердління.

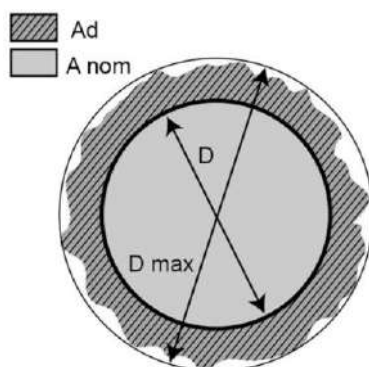


Рис. 11. Схема оцінки коефіцієнта двовимірного розшарування [2]

Але слід враховувати, що метод двовимірного розшарування може бути не точним (рис. 12) [5]. На цьому рисунку ми бачимо, що область розшарування варіантів *a*) та *b*) з однаковим коефіцієнтом Fa , але ж зразок на варіанті *b*) має більшу схильність до руйнування при меншому навантаженні, ніж варіант *a*). Пояснюється це тим, що Faraz у своєму методі не враховував внесок тріщин у пошкодження від розшарування. Метод двовимірного розшарування враховує лише розшаровану область.

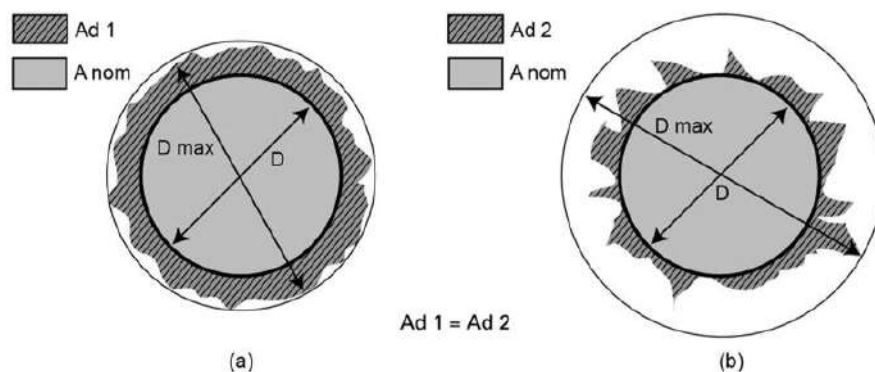


Рис. 12. Діаграма пошкодження від розшарування [2]

а – рівномірне пошкодження; б – не рівномірне пошкодження з тріщинами

Mehta M. [6], та інші пропонують коефіцієнт пошкодження D_{RAT} , що визначає відношення площі пошкодження на периферію отвору D_{MAR} до номінальної площі отвору D_{AVG} [6].

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{D_{AVG}}, \quad (4)$$

де D_{RAT} – коефіцієнт пошкодження;

D_{MAR} – площа пошкодження;

D_{AVG} – площа отвору.

Коефіцієнт пошкодження D_{RAT} подібний до двовимірного, але визначається як коефіцієнт, а не відсоток. Метод має ті ж недоліки, що і двовимірний.

Коефіцієнт розшарування F_d запропонований Mohan N.S. [7] визначає відношення площі розшарування до площі номінальної площі отвору.

Формула для розрахунку коефіцієнта розшарування F_d обчислюється:

$$F_d = \frac{A_d}{A}, \quad (5)$$

де A_d - сумарна площа отвору та відшарування;

A – номінальна площа отвору.

Метод запропонований Mohan, має ті ж недоліки, що і згадані вище.

Оскільки коефіцієнт розшарування F_d (5) не відповідає дійсним величинам розшарування, тому що не враховує площу розшарування, а метод двовимірного коефіцієнта розшарування F_a (3) не враховує довжину тріщин розшарування при оцінці розшарування. Davim J.P.[8] запропонував інший підхід до розрахунку, який називається скоригований коефіцієнт розшарування F_{da} (6), який схематично зображений на (рис. 13) [2].

Пояснення скорегованого коефіцієнта розшарування наступне: перша частина рівняння (6) є умовним коефіцієнтом розшарування F_d (5), що відображає пошкодження тріщини, а друга розмір площі пошкодження F_a (3) D_{RAT} (4).

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d(F_d^2 - F_d)}{A_{max} - A_0}, \quad (6)$$

де A_{max} – це площа, що відповідає D_{max} ;

A_0 – це площа, що відповідає D_0 ;

D_0 – діаметр отвору.

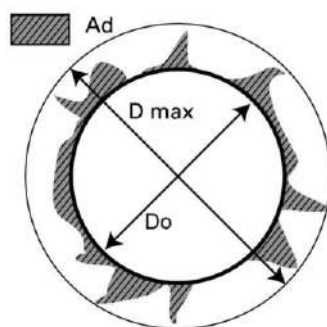


Рис. 13. Схема оцінки скоригованого коефіцієнта розшарування [2]

Цей метод більш прийнятний ніж ті, що наведені вище, оскільки він враховує довжини тріщин і розмір пошкодженої області (рис. 14)[2]. варіант *a*), *b*), *c*). Проте цей метод може бути неточним для варіанту *b*) – (рис. 14)[2], на цьому варіанті зображений випадок з великою кількістю дрібних тріщин, що становлять невелику площу.

Отже, коефіцієнт розшарування *Fda* для варіантів *a*), *c*), може бути однаковий, але варіант *b*) може бути схильний до помилкового значення *Fda* при малих навантаженнях. Більше того у цьому варіанті пошкоджена область *Ad* має множинний вплив на коефіцієнт *Fda*, що призведе до високих значень цього показника [2].

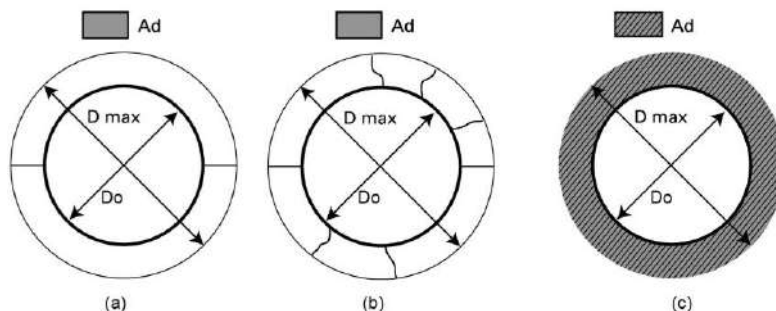


Рис. 14. Схематична діаграма пошкодження від розшарування [2]:

a – дрібні тріщини; *b* – велика кількість тріщин; *c* – максимальна площа відшарування

Скоригований коефіцієнт розшарування - *Fda* не має прямої кореляції з *Fa* і здебільшого як і методи, що наведені вище, може перевищувати значення фактору. Тому Tsao С.С. [9] запропонував визначати розшарування за еквівалентним коефіцієнтом розшарування *Fed* (рис.15) [2], що розраховується за формулою (7) [9].

$$F_{ed} = \frac{D_e}{D_0}, \tag{7}$$

де *De* – еквівалентний діаметр, який можна розрахувати за формулою (8) [9].

$$D_e = \left[\frac{4(A_d + A_0)}{\pi} \right]^{0,5}, \tag{8}$$

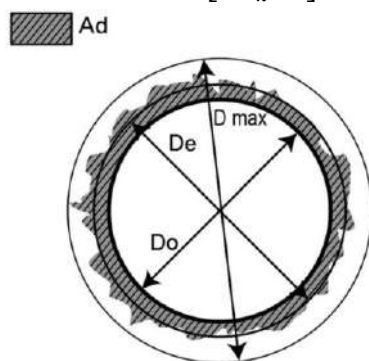


Рис.15 Схема визначення еквівалентного коефіцієнта розшарування [2]

Метод еквівалентного коефіцієнту розшарування F_{ed} теж може давати похибку, це пояснюється на (рис. 16) [2]. На цьому рисунку запропонована та ж схема розшарування для варіанту *a*) та *b*), а отже варіант *b*) має теж більшу схильність до руйнування при малих навантаженнях, ніж варіант *a*). Отже, цей метод показує те, що вплив тріщин на пошкодження є незначним. Основною увагою у цьому методі є пошкодження області, що утворилась внаслідок розшарування. Тому був запропонований наступний метод виміру розшарування, що використовував у своїй роботі Nagarajan V.A.[10] – уточнений коефіцієнт розшарування F_{DR} .

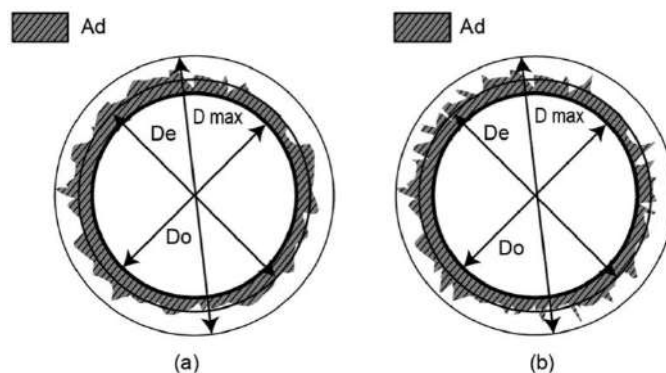


Рис. 16. Схема пошкодження від розшарування:
a – рівномірне пошкодження; *b* – пошкодження з тріщинами [2]

Уточнений коефіцієнт розшарування (F_{DR}) - Nagarajan запропонував розділити загальну площу розшарування на три зони, а саме (A_H) – площа сильного розшарування, (A_M) – площа середнього розшарування та (A_L) – площа малого розшарування. Ступінь пошкодження, яких визначається на основі глибини пошкодження. З допомогою програмного пакету MATLAB та Пі-теорема Букінгема він зміг пояснити це кількісно, що дало змогу виразити рівняння уточненого коефіцієнта розшарування (F_{DR}) (9)[10].

$$F_{DR} = \frac{D_{max}}{D_o} + 1,783 \left(\frac{A_H}{A_o} \right) + 0,7156 \left(\frac{A_M}{A_o} \right)^2 + 0,03692 \left(\frac{A_L}{A_o} \right)^3. \quad (9)$$

Цей метод є більш ефективний, так як враховує усі складові розшарування перелічені вище. Nagarajan провів декілька експериментів, щоб підтвердити свій метод, але його досліди обмежувались одним незмінним параметром, що був однаковий для усіх зразків, а саме швидкістю шпинделя $V=1400$ об/хв, що не дає змогу оцінити цей метод повністю.

Таким чином, для підтвердження методу уточненого коефіцієнту розшарування (F_{DR}) потрібно провести більше експериментів зі зразками при різних швидкостях обертання.

Також слід відмітити ще один такий фактор, як круглість форми його запропонував Dugao, який враховує форму пошкодженої області при визначенні розшарування. Цей метод визначається шляхом розрахунку подібності форми відшарованої області у порівнянні з колом рівного параметра[11].

Круглість форми при оцінці розшарування визначається за формулою:

$$f = 4\pi \frac{A_e}{P^2}, \quad (10)$$

Цей метод пояснюється тим, що коли область пошкодження нагадує коло, то круглість буде рівна 1, а коли витягнутою, то буде рівна 0. Цей метод орієнтується на форму пошкодження області. У своєму дослідженні Dugao дійшов висновку, що використання свердла із швидкорізальної сталі при обробці призводять до більш круглої форми пошкодженої області, тоді як твердосплавні не впливають на форму пошкодження. Але цей метод не є правильним тому як, він не зміг встановити зв'язок кореляції між круглістю та довжиною пошкоджень.

Отже, метод круглості форми не може оцінювати ступінь розшарування.

Одним із противників вище перерахованих методів був Da Silva, який підійшов до оцінки області розшарування з іншого боку. Він запропонував інший підхід до визначення пошкодження, що виникає при свердлінні і назвав його мінімальний коефіцієнт розшарування Fd_{\min} [12]. Da Silva припустив, що визначення фактору розшарування базується на тому, щоб легко порівняти отримані результати пошкодження різними методами свердління. Він пояснював його тим, що якщо мета оцінки пошкодження полягає в кількісній характеристиці, то форма пошкодження не є важлива і правильна. Оцінка розшарування має базуватись на найменшій площі, яка містить усі пошкодження, що виникають при свердлінні [12]. Коефіцієнт Fd_{\min} схожий на коефіцієнт $Fd(1)$, що зображений на (рис. 9), однак у його методі акцент робиться на мінімізацію. Це досягається шляхом проведення найменшого кола, що охоплює всю область пошкодження і його центр може збігатись або не збігатись з центром обробленого отвору.

Мінімальний коефіцієнт розшарування Fd_{\min} зображений на (рис. 17) [2] та розраховується за формулою (11) [12].

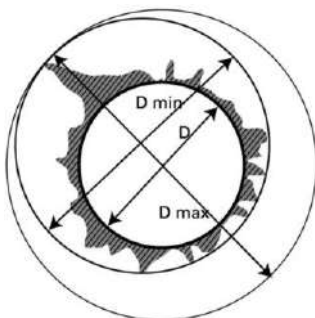


Рис. 17. Схема оцінка мінімального коефіцієнта розшарування [2]

$$Fd_{\min} = \frac{D_{\min}}{D}, \quad (11)$$

Метод Da Silva використовує концепцію мінімальних пошкоджень, що виникають при свердлінні і дає змогу порівнювати різні методи пошкоджень при свердлінні.

Його результати не дуже відрізняються від результатів, що виникають при оцінці методу вимірювання коефіцієнта розшарування $Fd(1)$, коли пошкодження є рівномірними навколо обробленого отвору, оскільки центр мінімальної області розшарування буде наближений до центру отвору (рис. 17)[2]

Отже, цей метод нехтує внеском площі та форми пошкодженої області в оцінці розшарування.

На практиці дослідниками були розроблені різні методи вимірювання, що включають такі розмірні параметри, як довжина та площа. Інсуочі методи вимірювання розшарування, що використовувались наведені нижче: мікроскопія Tagliaferri V. [14], обробка зображень Khashaba U.A. [15], акустична емісія Hocheng H. J. [16], рентгенографія [12], рентгенівська комп'ютерна томографія Hounsfield G.H.[17] та інші.

Висновки. Сьогодні композитні матеріали затребуванні в різних сферах промисловості і їх галузь застосування буде тільки зростати. Пояснюється це тим, що деталі з композитних матеріалів, а саме ВПКМ мають кращі експлуатаційні характеристики (легкість, собівартість, та міцність) ніж інші конструкційні матеріали.

Але деталі виготовлені з ВПКМ мають ряд недоліків, що виникають під час механічної обробки (процесу свердління), а саме деформації, що мають назву розшарування. У даній статі було з'ясовано, як правильно оцінити розмір розшарування та причини його утворення аби запобігати цьому в подальшому та збільшити ресурс експлуатації деталей з ВПКМ. Також при вивченні методів оцінки розшарування було з'ясовано, що метод – уточненого коефіцієнта розшарування F_{DR} який запропонував Nagarajan [10] є найбільш підходящим для подальших досліджень тому що цей метод враховував площу усіх пошкоджень що виникають при свердлінні.

Отже під час обробки ВПКМ свердлом виникають деформації, а саме (витягування волокон, міжшарові тріщини, розпушування, розшарування та ін.). Причини утворення розшарування є неправильно підібрані режими різання і неправильна або непідходяща геометрична форма свердла (кут загострення, форма каналу відводу стружки та покриття), що є дуже важливим фактором адже розшарування за часту виникають саме при вході та виході інструменту з отвору деталі.

Подальші дослідження у цьому напрямку будуть спрямовані саме на покращення цих параметрів.

Список використаних джерел

1. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летальных аппаратов (аналитический обзор) / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. А. Колесник и др. ; по общей ред. проф. В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга , 2013. – 272 с.
2. Assessment of delamination in composite materials: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B / J. Babu, T. Sunny, N. A. Paul, K. P. Mohan, J. Philip, J.P. Davim // Journal of Engineering Manufacture. – 2016. – № 230(11). – Pp. 1990-2003.
3. Chen, W. C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates / W. C. Chen // Int J Mach Tool Manu. – 1997. – № 37(8). – P. 1097-1108.
4. Sonbaty, E. I. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites / E. I. Sonbaty, U. A. Khashaba, T. Machaly // Compos Struct. – 2019. – № 63. – Pp. 329-338.
5. Faraz, A. Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // Int J Mach Tool Manu. – 2009. – № 49. – Pp. 1185-1196.
6. Mehta, M. Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates / M. Mehta, T. J. Reinhart, A. H. Soni // Proceedings of the machining composite materials symposium: ASM materials week (Chicago, IL, 1-5 November 1992). – Chicago, 1992. – Pp. 113-126.
7. Mohan, N. S. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials / N. S. Mohan, S.M. Kulkarni, A. Ramachandra // J Mater Process Tech. – 2007. – № 186. – Pp. 265-271.
8. Davim, J. P. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates / J. P. Davim, J. C. Campos Rubio, A. M. Abrão // Compos Sci Technol. – 2007. – № 67. – Pp. 1939-1945.
9. Tsao, C. C. Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill / C. C. Tsao, K. L. Kuo, I. C. Hsu // Int J Adv Manuf Tech. – 2012. – № 59. – Pp. 617-622.
10. Nagarajan V. A. A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade / V. A. Nagarajan, S. J. Rajadurai, A. T. Kumar // Compos Part B Eng. – 2012. – № 43. – P. 3153-3159.
11. Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods / L. M. P. Durão, M. R. S. Tavares, V. H. C de Albuquerque, D. J. S. Gonçalves // Compos Struct. – 2013. – № 96. – Pp. 576-583.
12. Da Silva D. N. R. Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP : Thesis [Electronic resource] / Da D. N. R. Silva ; Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. – Lisboa, 2013. – Access mode: <http://hdl.handle.net/10362/9866>.
13. Durao, L. M. Machining of hybrid composit. Ph. D : dissertation: 05.03.0 1 / L. M. Durao. – Porto, 2005. – 2024 p.
14. Caprino G. Damage development in drilling glass fiber reinforced plastics / G. Caprino, V. Tagliaferri // Int J Mach Tool Manu. – 1995. – № 35(6). – Pp. 817-829.
15. Khashaba, U. A. Delamination in drilling GFR-thermoset composites / U. A. Khashaba // Compos Struct. – 2004. – № 63. – Pp. 313-327.
16. Hocheng, H. J. Reliability monitoring in drilling electronic circuit boards / H. J. Hocheng // ASME Trans J Electron Package. – 1991. – № 113. – Pp. 263-267.
17. Hounsfield, G. H. Computerized transverse axial scanning (tomography). Part-I. Description of system / G. H. Hounsfield // Br J Radiol. – 1973. – № 46. –Pp. 1016-1022.

References

1. Krivoruchko, D.V., Zaloga, V.A. (ed.), Kolesnik, V.A., etc. (2013). *Mekhanicheskaia obrabotka kompozytsionnykh materialov pry sborke letalnykh apparatov (analytycheskyi obzor) [Mechanical processing of composite materials during the assembly of aircraft]*. University Book.

2. Babu, J., Sunny, T., Paul, N.A., Mohan, K.P., Philip, J., Davim, J.P. (2016). Assessment of delamination in composite materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(11), 1990-2003.
3. Chen, W.C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *Int J Mach Tool Manu* 1997; 37(8): 1097–1108.
4. Sonbaty, E., Khashaba, U.A., Machaly, T. (2019). Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. *Compos Struct*, 63, 329–338.
5. Faraz, A., Biermann, D., Weinert, K. (2009). Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *Int J Mach Tool Manu*, 49, 1185–1196.
6. Mehta, M., Reinhart, T.J., Soni, A.H. (1992). Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates. *Proceedings of the machining composite materials symposium: ASM materials week*. (PP. 113–126). Chicago, IL.
7. Mohan, N.S., Kulkarni, S.M., Ramachandra, A. (2007). Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *J Mater Process Tech*, 186, 265–271.
8. Davim, J.P., Campos Rubio, J.C., Abrão, A.M. (2007). A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Compos Sci Technol*, 67, 1939–1945.
9. Tsao, C.C., Kuo, K.L., Hsu, I.C. (2012). Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill. *Int J Adv Manuf Tech*, 59, 617–622.
10. Nagarajan, V.A., Selwin Rajadurai, J., Annil Kumar, T. (2012). A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade. *Compos Part B Eng*, 43, 3153–3159.
11. Durão, L.M., Tavares, M.R.S., de Albuquerque, V.H.C. (2013). Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods. *Compos Struct*, 96, 576–583.
12. Da Silva, D.N.R. (2013). Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP. Thesis 2013; Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
13. Durao, L.M. (2005). Machining of hybrid composit. Ph. D. dissertation : 05.03.01.
14. Caprino, G., Tagliaferri, V. (1995). Damage development in drilling glass fiber reinforced plastics. *Int J Mach Tool Manu*, 35(6), 817–829.
15. Khashaba, U.A. (2004). Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Compos Struct*, 63, 313–327.
16. Hocheng, H. J. (1991). Reliability monitoring in drilling electronic circuit boards. *ASME Trans J Electron Package*, 113, 263–267.
17. Hounsfield, G.H. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography). Part-I. Description of system. *Br J Radiol*, 46, 1016–1022.

Отримано 22.03.2024

UDC 621.7

Bogdan Dzyuman¹, Oleksii Osypchuk², Oleksandr Okhrimenko³

¹PhD-student of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: dzyumanbogdan@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-5928-4569>

²PhD-student of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: aleksei.osypchuk@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7865-9484>

³Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: okhrimenko.oleksandr@ill.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>
ResearcherID: [M-2462-2017](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987). **Scopus Author ID:** [57222590572](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987)

FEATURES OF DRILLING COMPOSITE MATERIALS AND THEIR INFLUENCE ON PROCESSING DEFECTS

This article is a review. Presented in the article information is an overview.

In the modern world, composite materials have become more in demand and this is connected to the rapid development of mechanical engineering and aircraft construction. Most companies aim to improve the performance of their product and reduce the cost of manufacturing time, financing and production waste.

The technology of manufacturing parts, assemblies and assembly units from composite materials is rapidly developing, but there are still a number of unresolved problems arising during their processing. The effect of delamination on the quality of the hole being processed is one of them. The quality of the opening is one of the main parameters of any design, how exactly this element can be used as a connecting element, which is responsible for the entire future assembly unit.

When processing holes with a drill, a defect often occurs - delamination, which subsequently affects the quality and ability of the part to perform its functions. The problem of delamination in parts made of fibrous polymer composite materials is poorly studied. Therefore, the purpose of this article is to review existing problems and methods of solving them. Stratifications that occur during the processing of holes are mostly formed as a result of incorrectly selected cutting modes, namely feed (S) and tool rotation speed (V), which in turn leads to a number of defects: cracks, chips, pulling out fibers, loosening) and with the subsequent formation of delamination. This article examined how important and correct it is to assess the size and area of damage during delamination in order to understand how to prevent this process.

Therefore, after analyzing scientific works and understanding the process of formation of delamination, namely its assessment and its distribution in the treated area, it is possible to understand that the assessment of the size of delamination should take into account the following factors: the maximum diameter of the damaged area, the number and density of interlayer cracks, the area of delamination and cutting modes .

Optimizing cutting modes and improving the geometric shape of the cutting tool makes it possible to minimize or even eliminate the delamination process for parts made of SPCM.

Keywords: *drill, layering, cutting tool, composite material, CM, processing, SPCM.*

Table: 1. Fig.: 17. References: 12.

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-1(35)-121-127

УДК 616-085:311.218

Володимир Єременко¹, Олена Монченко², Тарас Монченко³, Валентина Кучеренко⁴

¹доктор технічних наук, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: nau_307@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4330-7518>. Scopus Author ID: 56736964700

²кандидат технічних наук, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)

E-mail: monchenko_olena@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8248-5704>.

ResearcherID: [AAN-1910-2020](https://orcid.org/0000-0002-8248-5704). **ID Scopus:** 56422110000

³здобувач вищої освіти кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: mtm082220-ames27@ill.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-3294-7023>

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)

E-mail: valentyna.kucherenko@npp.nau.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1009-8729>

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОПРАЦЮВАННЯ МЕДИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Розроблено інформаційну технологію обробки медичних показників шляхом застосування гістограмного аналізу. Проведено аналіз гістограмних досліджень при обробці потоків даних. Розроблено алгоритм роботи, який складається з двох етапів, проаналізовано отримані результати. На першому етапі побудовано гістограми для всіх медичних показників. На другому етапі проаналізовано ймовірність зміни кожного показника, що дало можливість перейти від конкретного пацієнта до ймовірності в досліджуваній групі та проаналізувати: збільшилась чи зменшилась ймовірність впливу певним методом лікування. Використана інформаційна технологія застосування гістограмних чисел для обрахунку медичних показників і визначення частки пацієнтів, для яких лікування виявилось ефективним. Окреслені основні етапи розробки, що дають змогу здійснювати гістограмний аналіз і приймати рішення щодо подальших досліджень.

Ключові слова: гістограмний аналіз; інформаційна технологія; медичні показники.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Гістограмний аналіз є одним із сучасних методів графічного аналізу даних. З історичної перспективи метод цей заснований на тезисі, що варіація показників результатів вимірювань є інтегральною. Цілком зрозуміло, що виходячи виключно з цього твердження не можливо отримати інформацію про характер помилок, таким чином не можливо зрозуміти, чи виникли помилки дослідженні статистично, чи є наслідком якоїсь проблеми, адже відповіді на це інтегральні параметри дати не можуть.

Гістограмний аналіз є важливим інструментом у статистичному аналізі для дослідження вибіркового закону розподілу. Цей метод використовує гістограму для визначення частоти або кількості спостережень у різних інтервалах або «кошиках» даних.

Гістограмний аналіз застосовується в багатьох сферах. До прикладу, дослідження варіації даних: гістограми допомагають побачити як розподіл даних, чи є він нормальним, або відповідає одному з теоретичних законів розподілу тощо. Виявлення аномалій: завдяки гістограмам можна виявляти викиди або аномальні значення в наборах даних. Відсутність або наявність певних фрагментів, вимірювання центральних моментів, порівняння розподілів, попередній аналіз перед статистичними тестами, оптимізація бізнес-процесів, аналіз лабораторних показників, дослідження захворювань, фармакологічні дослідження, оцінка ризиків, епідеміологічні дослідження, класифікація даних тощо.

Загалом гістограмний аналіз також є потужним інструментом для аналізу медичних даних, дозволяючи відкривати закономірності, виявляти аномалії та забезпечувати підґрунтя для подальших досліджень.

Постановка проблеми. Аналіз існуючих алгоритмів подання та опрацювання медичної інформації показує, що вони не повною мірою задовольняють вимоги до розв'язання задач, що вимагають складних логічних висновків з урахуванням неповноти та суперечливості вхідних даних. Для вирішення вказаної проблеми необхідно шукати нові технології опрацювання медичних даних.

Для постановки правильного діагнозу та призначенні ефективного лікування лікарям доводиться знімати велику кількість різних показників: антропогенних, по крові тощо.

На підставі цього, необхідно розробити інформаційну технологію, яка б допомагала практикуючим лікарям підвищити якість прийнятих рішень щодо вибору схеми лікування з урахуванням індивідуальних особливостей хворого. Ефективна інформаційна стратегія запобігає появі небажаних наслідків лікування (а саме алергічної реакції на фармакологічні засоби) та сприяє зменшенню собівартості послуг, а також покращує їхню ефективність, завдяки чому лікувальні установи можуть значно покращити рівень своєї роботи.

У статті [1] показані нефармакологічні стратегії, спрямовані на зміни у способі життя, що можуть позитивно впливати на артеріальний тиск (АТ). Доведено за рахунок визначення відстані Махаланобіса, що для лікування артеріальної гіпертензії (АГ) та ожиріння ефективно показав себе новий метод лікування DASH. Таким чином, DASH може бути рекомендованим методом для зниження АТ у дорослих з попереднім етапом гіпертензії. Проте ці технології фактично визначають інтегральні параметри, які не дають можливості окремо аналізувати впливи на медичні показники.

Постала задача детального аналізу кожного отриманого показника для виявлення впливу лікування на кожен показник з подальшим аналізом та прогнозом щодо перебігу лікування.

У статті запропоновано використання гістограмного аналізу кожного показника по досліджуваних групах: група здорових пацієнтів (M1), група хворих пацієнтів, які приймали лікування DASH (M2), та група хворих пацієнтів, які лікувались стандартним методом (M3).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] запропоновано інформаційну технологію, що полягає у статистичній обробці великої кількості різнопланових даних, що ґрунтується на використанні відстані Махаланобіса. Такий підхід дав загальний результат і підтвердив ефективність нових методів лікування артеріальної гіпертензії та надлишкової ваги.

У роботі [2] розроблено інформаційну технологію обробки персоналізованої медичної інформації для прийняття рішень і як засіб її реалізації та запропоновано систему підтримки прийняття лікарських рішень, розроблено її архітектуру, проаналізовано отримані результати.

В роботі [3] запропонований метод гістограмного аналізу, який підходить для інкрементального навчання, а також для задач, де потоки даних неперервні, як у більшості сучасних додатків для інтелектуального аналізу даних.

У статті [4] використаний гістограмний аналіз при обробці гістологічних і цитологічних зображень.

Проведений аналіз досліджень і публікацій показав, що гістограмний аналіз дає гарні результати при обробці потоків даних. У медичних дослідженнях інформаційна технологія, що ґрунтується на застосуванні гістограмного аналізу медичних показників, практично не використовується.

У роботі пропонується інформаційна технологія гістограмного аналізу ендокринологічних показників при лікуванні артеріальної гіпертензії та надлишкової ваги.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Для дослідження розподілу ваги в дослідній групі та отримання інформації про характеристики цього розподілу, такі як середнє значення, медіана, дисперсія та інші параметри необхідно провести додаткові дії. Це може допомогти визначити, наскільки поширена проблема надлишкової ваги в

певній групі та розробити ефективність стратегії лікування. Зокрема, гістограмний аналіз може допомогти визначити частку пацієнтів, у яких показники в нормі, або виходять за межі норми, що дає можливість використати стандартні методики статистичних досліджень і може бути корисним для розробки ефективних методів лікування.

Мета статті – розробити інформаційну технологію аналізу ймовірності зміни значень медичних показників в процесі обраного методу лікування.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо окремий випадок прийняття рішення за результатами вимірювання слабоінформативних параметрів. Припустимо, що задані еталонні вибірки вимірювань одного слабо інформативного параметра, яким є певний медичний показник: $x_1(k)$ і $x_2(k)$, $k=1,2,\dots,n$. Визначимо за об'єднаною вибіркою вимірювань мінімальне $x_{\min}=\xi_1$ значення та максимальне – $x_{\max}=\xi_n$. Виберемо число гістограмних інтервалів L та обчислимо розмір елементарного інтервалу дискретизації $\Delta x = \frac{(\xi_n - \xi_1)}{L}$. За вибірками вимірювань визначимо гістограмні числа еталонних вимірювань об'єктів O_1 і O_2 : $k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1l}$ і $k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2l}$.

Гістограмні числа k_1, k_2, \dots, k_l є випадковими величинами. За допомогою гістограмних чисел визначаємо частку пацієнтів, для яких лікування виявилось ефективним. Це можна також трактувати як ймовірність ефективності лікування. Якщо відомий закон розподілу результатів вимірювання $W(x)$, то можна визначити ймовірність попадання в i -тий інтервал гістограми одного вимірювання

$$p_i = \int_{x_{oi} - \frac{\Delta x}{2}}^{x_{oi} + \frac{\Delta x}{2}} W(x) dt \approx W(x_{oi}) \Delta x$$

та записати поліноміальний закон розподілу гістограмних чисел

$$P_n(k_1, k_2, \dots, k_l) = \frac{n! \prod_{i=1}^l p_i^{k_i}}{\prod_{i=1}^l (k_i)!} \quad (1)$$

Гістограмні числа є залежними випадковими величинами, тому що їх сума $\sum_{i=1}^l k_i = n$. Кожне з чисел k_i підпорядковується біноміальному закону розподілу ймовірностей. Оскільки $M[k_i] = np_i$, $D[R_i] = np_i(1-p_i)$, $M[k_i k_j] = n^2 p_i p_j - np_i p_j$, то коефіцієнт кореляції r_{ij} , дорівнює

$$r_{ij} = - \frac{\sqrt{p_i p_j}}{\sqrt{(1-p_i) \cdot (1-p_j)}}.$$

Таким чином, якщо об'єкти розпізнавання O_1 і O_2 , описуються багатовимірними законами розподілу $W(x^k/O_1)$ та $W(x^k/O_2)$, то їх гістограми описуються поліноміальними законами розподілу $P(k^k/O_1)$ та $P(k^k/O_2)$ з параметрами p_{1i} та p_{2i} , $i = 1, 2, \dots, L$. Гістограмні числа еталонних вимірювань об'єктів O_1 і O_2 є оцінками ймовірностей p_{1i} та p_{2i}

$$p_{1i}^* = \frac{k_{1i}}{n} = p_{11}^*, \quad p_{2i}^* = \frac{k_{2i}}{n} = p_{21}^*. \quad (2)$$

За еталонні вимірювання приймемо показники, зняті зі здорової групи досліджуваних $M1$ p_{11}^* . Гістограмні числа показують ймовірність значення показника у групи досліджуваних пацієнтів. Досліджувана група, що приймала лікування 1, має гістограмні показники: до лікування p_{21}^* , після лікування p_{22}^* . Досліджувана група, що приймала лікування 2, має гістограмні показники: до лікування p_{31}^* , після лікування p_{32}^* .

Різниця гістограмних чисел $\Delta_2 = p_{22}^* - p_{21}^*$, $\Delta_3 = p_{32}^* - p_{31}^*$.

Матеріали та методи досліджень. Для виконання запропонованої інформаційної технології в роботі був запропонований алгоритм, наведений на рис. 1.

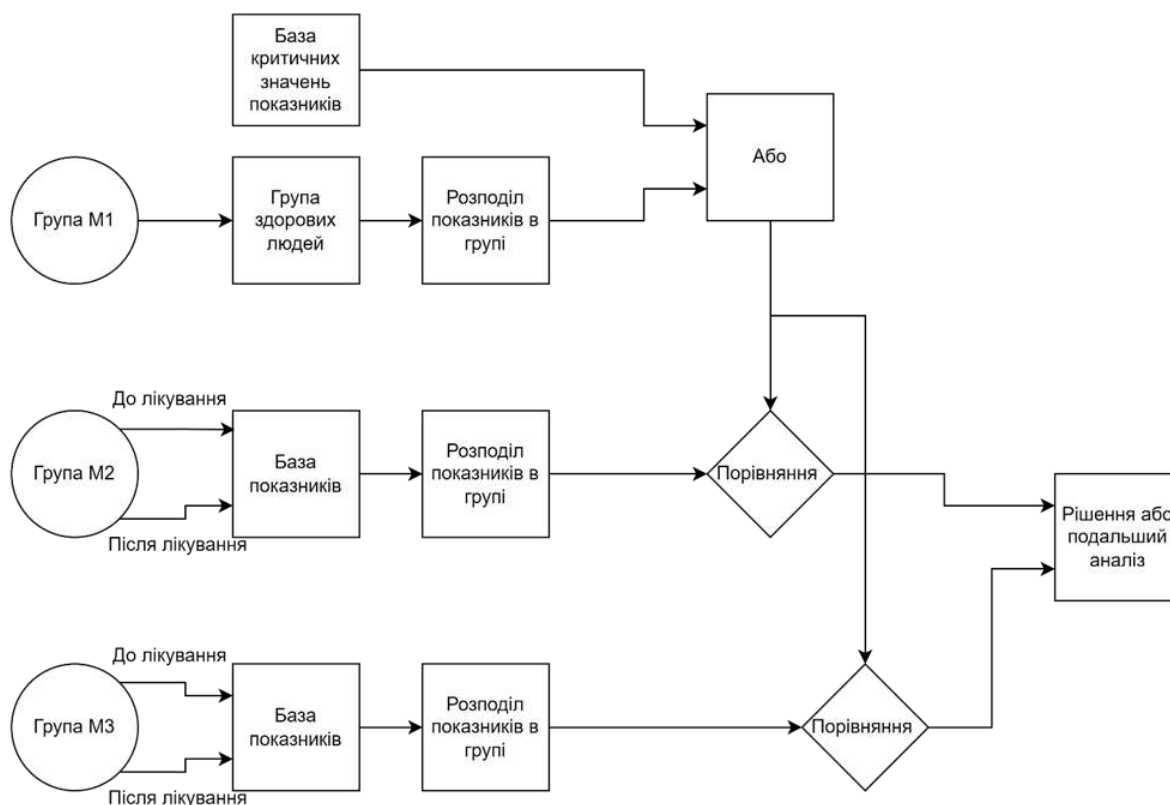


Рис. 1. Алгоритм роботи інформаційної технології обрахунку медичних показників гістограмним методом

У процесі проведення роботи отримано дані до та після лікування надлишкової ваги трьох груп пацієнтів. На основі цих матеріалів було побудовано гістограми розподілу даних. З 32 показників отримано сумарно близько 150 розподілів, які допомагають наочно побачити зміни в показниках пацієнтів. Першим етапом досліджень була побудова гістограм по всіх показниках з нормуванням за формулами (1), (2) для представлення загальної картини до та після лікування двома типами лікування 1 і 2. Фрагмент побудованих гістограм наведений на рис.2 (вісь X – значення показника; вісь Y– кількість пацієнтів):

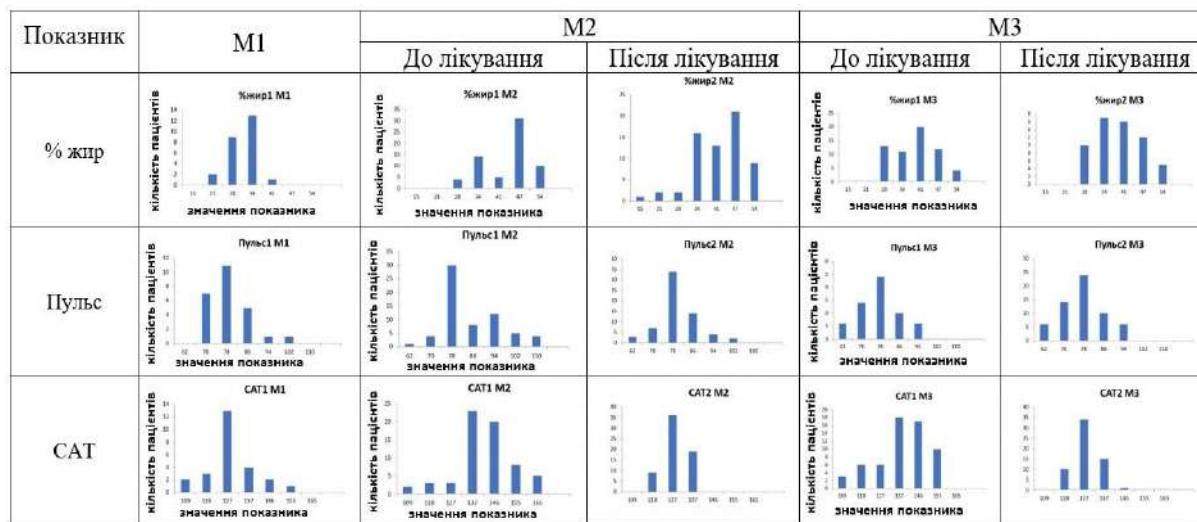


Рис. 2. Фрагмент нормованих гістограм

Другим етапом був проведений розрахунок ймовірності щодо покращення або погіршення рівня показника. Особливістю обрахунку є те, що нема прив'язки до конкретного пацієнта. Підрахунок відбувався за формулами (1), (2), що дало можливість перейти від конкретного пацієнта до ймовірності в досліджуваній групі та проаналізувати «тонку» структуру: збільшилась чи зменшилась ймовірність впливу певним методом лікування.

Результати досліджень. До прикладу розглянемо структуру зміни ймовірності в показнику «Пульс» до та після лікування методикою 1 (група M2) (рис. 3):



Рис. 3. Зміна ймовірності в показнику «Пульс» до та після лікування методикою 1

Як видно з рис. 3, ймовірність появи пацієнтів зі значеннями пульсу 110 після лікування дорівнює нулю. Також ймовірність появи пацієнтів зі значеннями пульсу 102 до лікування була 0,06, після лікування ймовірність знизилась до 0,03. Ймовірність значення пульсу 94 до лікування 0,16, після лікування 0,03. Отримані результати показують те, що лікування за методикою 1 для нормалізації пульсу є підходящим.

Також запропонована в роботі інформаційна технологія гістограмного аналізу медичних показників виявила показники, які показали суттєве погіршення після обох методик лікування, а значить необхідно звернути увагу на ці показники і провести додаткові дослідження.

Третій етап досліджень був більш інтегральним і полягав у порівнянні отриманих після лікування обома методиками гістограм з пороговими значеннями показників.

Результати розрахунку ймовірності за всіма показниками наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку ймовірності за показниками

Показники	p ₁₁ *	M2		Δ ₂	M3		Δ ₃
		p ₂₁ *	p ₂₂ *		p ₃₁ *	p ₃₂ *	
Вага	0,6	1,45	1,45	0	1,45	1,45	0
ІМТ	0,44	0,52	0,52	0	0,52	0,52	0
% жиру	1,36	0,22	0,64	0,042	0,17	0,26	0,09
Пульс	0,44	0,47	0,53	0,06	0,375	0,375	0
САТ	5,08	0,05	0,56	0,51	0,09	0,53	0,44
ДАТ	0,72	0,45	0,78	0,33	0,4	0,79	0,39
Креат сечі	0,64	0,52	1	0,48	0,48	0,94	0,46
Гліков Нб	0,96	0,22	0,125	-0,095	0,186	0,078	-0,11
Сеч к-та	0,6	0,26	0,16	-0,1	0,25	0,14	-0,11
Глюкоза	0,76	0,83	0,84	0,1	0,78	0,3	-0,48
Хол заг	0,68	0,63	0,68	0,05	0,55	0,42	-0,13
Тригліц	0,76	0,42	0,7	0,28	0,39	0,45	0,06
ЛПВЩ	0,68	0,06	0,09	0,03	0,05	0,08	0,03
ХЛНЩ	0,88	0,19	0,14	-0,05	0,14	0,14	0
ЛпДНЩ	0,88	0,23	0,28	0,05	0,19	0,25	0,06
Коеф атерог	0,8	0,27	0,36	0,09	0,28	0,16	-0,12
Кальцій іонізов	0,52	0,06	0,05	-0,01	0,05	0	-0,05
Лептин сиров	0,92	0,3	0,23	-0,07	0,27	0,2	-0,07

Значення, отримані в « Δ_2 » показують ймовірність того, що в результаті лікування M2 покращився показник, якщо значення позитивне, і відповідно погіршився, якщо значення негативне.

Значення, отримані в « Δ_3 » показують ймовірність того, що в результаті лікування M3 покращився показник, якщо значення позитивне, і відповідно погіршився, якщо значення негативне.

Наприклад, показник «САТ» покращився лікуванням M2 Різниця 0,51, а при M3 0,44; а показник «ДАТ» покращився лікуванням M3 0,39, а при M2 0,33.

Є певні показники, які погіршились після обох методик лікування. Наприклад: «Глюкоза», «Кальцій іоніз», «Лептин», а значить необхідні додаткові дослідження.

Висновки. У статті представлена інформаційна технологія опрацювання медичних показників на основі методу гістограмного аналізу. Гістограмний аналіз є важливим інструментом в медичній статистиці й дослідженнях. Цей метод дозволяє візуально і кількісно оцінити розподіл даних, що є корисним для виявлення відхилень, асиметрії та інших характеристик розподілів.

Аналіз показників, отриманих двома різними методиками лікування, показав як позитивні зміни, так і негативні, що потребують подальших досліджень. Особливістю запропонованої інформаційної технології є те, що вона дає змогу оцінити стан показника загалом, без прив'язки до конкретного пацієнта.

Список використаних джерел

1. Метод статистичного оцінювання результатів клінічних досліджень при лікуванні артеріальної гіпертензії та ожиріння / В. Єременко, О. Монченко, С. Корчева, Л. Чубко // Технічні науки та технології: науковий журнал. – 2023. – № 2 (32). – С. 164.
2. Мельникова, Н. І. Розроблення інформаційної технології опрацювання персоналізованих медичних даних / Н. І. Мельникова, О. Б. Вовк, Т. О. Дубінець // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія : Інформаційні системи та мережі. – 2015. – № 814. – С. 90-99.
3. Discretization from Data Streams: Applications to Histograms and Data Mining / M. Afonso-Dias, J. Simoes, C. Pinto // *Gis/spatial analysis in fishery and aquatic sciences : Proceedings 2th International Symposium on GIS/Spatial Analysis in Fishery and Aquatic Sciences.* – Saitama, 2014. – Pp. 323-340.
4. Піцун, О. Адаптивний метод попередньої обробки гістологічних та цитологічних зображень / О. Піцун // Вісник НУ «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2017. – № 864. – С.111-118.
5. Mills, K. T. The global epidemiology of hypertension / K. T. Mills, A. Stefanescu, J. He // *NatRevNephrol.* – 2020. – № 16. – С. 223-237. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41581-019-0244-2>.
6. WHO Global Health Observatory. Prevalence of raised blood pressure: situation and trends. [Electronic resource]. – Access mode: http://www.who.int/gho/ncd/risk_factors/blood_pressure_prevalence_text/en.
7. Малайчук, В. П. Математическая дефектоскопия : монография / В. П. Малайчук, А. В. Мозговой. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 180 с.

References

1. Eremenko, V., Monchenko, O., Korcheva, S., Chubko, L. (2023). Method of statistical evaluation of clinical trial results in the treatment of hypertension and obesity. *Technical sciences and technologies*, 2(32), 164.
2. Melnikova, N.I., Vovk, O., Dubinets, T. (2015). Development of information technology for processing personalized medical data. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Seriya: Informatsiini systemy ta merezhi – Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Information systems and networks*, 814, 90-99.
3. Afonso-Dias, M., Simoes, J., Pinto, C. (2014). Discretization from Data Streams: Applications to Histograms and Data Mining. *Gis/spatial analysis in fishery and aquatic sciences. Proceedings 2th International Symposium on GIS/Spatial Analysis in Fishery and Aquatic Sciences.* (pp. 323–340). Saitama, Japan.

4. Pitsun, O. (2017). *Adaptyvnyi metod poperednoi obrobky histolohichnykh ta tsytolohichnykh zobrazhen* [Adaptive method of histological and cytological images pre-processing]. *Visnyk NU «Lvivska politekhnika». Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii – Bulletin of Lviv Polytechnic National University Computer Science and Information Technology*, 864, 111-118.
5. Mills, K.T., Stefanescu, A. & He, J. (2020). The global epidemiology of hypertension. *NatRevNephrol*, 16, 223–237. <https://doi.org/10.1038/s41581-019-0244-2>.
6. WHO Global Health Observatory. Prevalence of raised blood pressure: situation sandtrends. http://www.who.int/gho/ncd/risk_factors/blood_pressure_prevalence_text/en/.
7. Malaychuk, V.P., Mozgovoy, A.V. (2005). *Matematycheskaia defektoskopiya [Mathematical Defectoscopy]*. System Technologies.

Отримано 16.02.2024

UDC 616-085:311.218

Volodymyr Yeremenko¹, Olena Monchenko², Taras Monchenko³, Valentyna Kucherenko⁴

¹Doctor of Technical Science, Chief of Department of Information Measuring Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: nau_307@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4330-7518>. **Scopus Author ID:** 56736964700

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor Department of Biocybernetics and Aerospace Medicine
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)
E-mail: monchenko_olena@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8248-5704>
ResearcherID: AAN-1910-2020. **ID Scopus:** 56422110000

³Student, Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: mtm082220-ames27@ill.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-3294-7023>

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor Department of Biocybernetics and Aerospace Medicine
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)
E-mail: valentyna.kucherenko@npp.nau.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1009-8729>

INFORMATION TECHNOLOGY FOR PROCESSING MEDICAL INDICATORS

The article presents a new information technology for processing medical indicators, which is based on the method of histogram analysis. Histogram analysis, known as a key tool in medical statistics, allows visually and quantitatively evaluate the distribution of data, which becomes important for detecting asymmetry, deviations and other characteristics of the indicator base.

The analysis of the existing algorithms for presenting and processing medical information shows that they do not fully satisfy the requirements for solving problems that require complex logical conclusions, taking into account the incompleteness and inconsistencies of the input data. To solve this problem, it is necessary to look for new technologies for processing medical data.

It is proposed to use a histogram analysis of each indicator for the studied groups: a group of healthy patients (M1), a group of sick patients who received DASH treatment (M2), and a group of sick patients who were treated by the standard method (M3).

The purpose of the article is to develop an information technology for the analysis of the probability of changes in the values of medical indicators in the course of the chosen method of treatment.

The mathematical justification and algorithm of information technology for calculating medical indicators using the histogram method have been developed, fragments of normalized histograms and the obtained results are given. Information technology for processing medical indicators based on the method of histogram analysis is presented.

Histogram analysis is an important tool in medical statistics and research. This method allows visually and quantitatively evaluate the distribution of data, which is useful for detecting deviations, asymmetry and other characteristics of distributions.

Analysis of the indicators obtained by two different treatment methods showed both positive and negative changes, which require further research. A feature of the proposed information technology is that it allows assessing the state of the indicator as a whole, without reference to a specific patient.

Keywords: histogram analysis; information technology; medical indicators.

Fig.: 3. *Table:* 1. *References:* 7.

Ольга Бондар¹, Олексій Извалов²

¹кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних технологій
Економіко-технологічного Інституту ім. Р. Ельворті (Кропивницький, Україна)

E-mail: bondarkla@ukr.net **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-5877-5667>

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій
Економіко-технологічного Інституту ім. Р. Ельворті (Кропивницький, Україна)

E-mail: alexey@globalgamejam.org **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-4935-7153>

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ В КОМП'ЮТЕРНИХ НАУКАХ

На основі широкого уявлення про математичну модель, як про абстрактний об'єкт, який може бути, зокрема, методом дослідження, у роботі досліджено розв'язки окремих задач, які запропоновано розглянути в якості математичних моделей. Розглянуто приклади визначення або ідентифікації реальних об'єктів програмування за отриманими моделями з їх можливими застосуваннями в комп'ютерних науках. Показано значення даного дослідження для розвитку абстрактного мислення програмістів. Зазначена можливість застосування дослідження в навчанні майбутніх фахівців з комп'ютерних наук, а саме, майбутніх вебдизайнерів, розробників ігрових додатків, фахівців з розпізнавання образів.

Ключові слова: математичне моделювання; інформаційні технології; абстрактне мислення; ігрові додатки; розпізнавання образів.

Рис.: 6. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Математичні моделі широко застосовуються у різних галузях людської діяльності. Математичне моделювання посідає провідне місце серед інших методів досліджень, особливо завдяки сучасній комп'ютеризації суспільства. Наприклад, IBM і NASA створюють моделі, щоб зробити наукові знання більш доступними. Ці моделі можна використовувати в різноманітних програмах, від класифікації та визначення об'єктів до відповідей на запитання та пошуку інформації.

Моделювання досягає високої продуктивності в різних областях: астрофізиці, геліофізиці, в біологічних, медичних, фізичних науках. Реалізована у вигляді програмного коду модель об'єкта дослідження тим повніше описує властивості і взаємозв'язки об'єкта, чим точніше є його модель.

Маючи на увазі впровадження відкритого та прозорого штучного інтелекту, іноземні компанії створюють доступні моделі, зокрема, для вдосконалення наукової пошукової системи за допомогою цих моделей.

В цьому контексті дослідження абстрактних математичних моделей з установленням їх відповідності тим чи іншим об'єктам є важливим, оскільки «Більшість математичних моделей – це результат роботи математиків, але не дослідників конкретної проблеми або предметної області» [1, с. 13].

Відтак, включення в методологію навчання фахівців з інформаційних технологій визначення відповідності математичної моделі певному об'єкту з можливими напрямками його застосування є актуальним для розв'язку задач комп'ютерних наук.

Постановка проблеми. Зазвичай під моделлю розуміють функцію або відображення прообраза – множини, як правило, відомих вхідних параметрів в образ – множину вихідних параметрів. Задача ідентифікації моделі розглядається, як задача пошуку серед множини можливих моделей тої, яка перетворює заданий прообраз в необхідний образ.

При цьому адекватність моделі визначається не тільки потрібним образом – цілком дослідження, а і відповідністю реальному об'єкту. Ідентифікація цього об'єкта-прообразу за відомою його математичною моделлю є складною проблемою, зокрема, при дослідженні інформаційних систем. Проблема оцінки невизначеності також ускладнює процес обґрунтування правильності моделей, створюючи ситуацію, у якій ані модельована, ані спостережувана поведінка системи не відомі з упевненістю [2].

У багатьох випадках розв'язати проблему дозволяє абстрактне мислення, завдяки якому можна отримати формальне підтвердження (або обґрунтування) адекватності розглядуваної моделі.

Відтак, розвиток абстрактного мислення є важливим для фахівця з інформаційних технологій. Програміст з розвиненим абстрактним мисленням може всебічно оцінити завдання, визначити його логічні частини і їх взаємозв'язок, оцінити складність і знайти оптимальний алгоритм виконання.

При цьому проблема формування образного мислення, яке пов'язане з процесами уяви, вилученням необхідної інформації з пам'яті, об'єднанням образів в структурні моделі є важливою складовою системи підготовки фахівця з комп'ютерних наук.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До математичних моделей іноді відносять [3] моделі, які використовують математичні формули для представлення зв'язку між різними змінними, параметрами та обмеженнями. Більш широкий погляд демонструє уявлення про математичну модель, як про абстрактний об'єкт, який відповідає проблемі розв'язання того чи іншого класу математичних і прикладних задач [4].

В цьому контексті навіть дослідження певного об'єкта може розглядатися як модель дослідження інших об'єктів з метою їх практичного застосування (рис. 1). Наприклад, у роки другої світової війни дослідження операцій широко застосовувалося для планування бойових дій – операцій. По закінченні війни фахівці з дослідження операцій, продовжуючи свою роботу в збройних силах США і Великої Британії, опублікували ряд результатів у відкритій пресі, що викликало сплеск суспільного інтересу до цього напрямку. Відтак виникла тенденція до застосування методів дослідження операцій у комерційній діяльності, в економіці, промисловості. Таким чином, дослідження військових операцій виявилось моделлю дослідження людської діяльності в багатьох галузях [5].

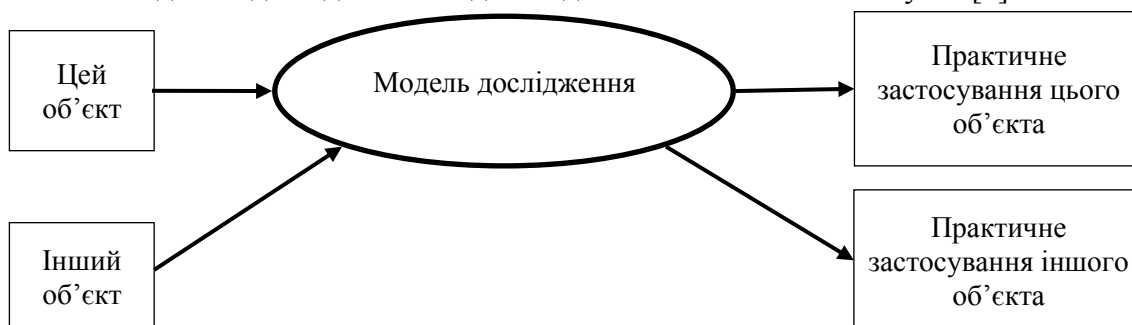


Рис. 1. Модель дослідження як математична модель

Джерело: розроблено авторами.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Процес математичного моделювання часто визначають (з різною мірою деталізації) наступною послідовністю дій: дослідження властивостей певного об'єкта, створення його моделі, вивчення відповідних властивостей моделі і її практичне застосування.

У комп'ютерному програмуванні процес моделювання природньо визначається професійними якостями програмістів, а саме, наявністю у них логічного, гнучкого й динамічного мислення, високого рівня розвитку пам'яті (особливо словесно-логічної) та уваги, розвинутої уяви, що є передумовою для розвитку творчого мислення [6].

Аналогічно тому, як тіло загартовується фізичними вправами, проблема розвитку абстрактного мислення програміста вирішується «розумовими вправами», тобто з набуттям ним відповідного професійного досвіду. Відомий композитор Д. Уільямс казав: «Без практики – теорія марна, після практики теорія – очевидна».

Метою статті є формування насамперед у програмістів-початківців уміння бачити в абстрактних математичних моделях множини реальних об'єктів з можливостями їх застосування в комп'ютерних науках (рис. 2).

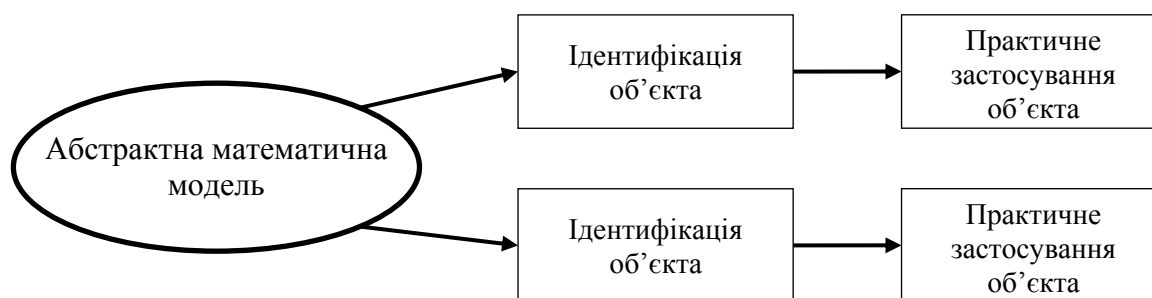


Рис. 2. Схема дослідження моделі

Джерело: розроблено авторами.

Виклад основного матеріалу. Зацікавленість даною темою виникла у нас із розгляду кількох задач, які пропонувалися всім бажаючим групою вчених і дослідників, пов'язаних з IBM Research [7].

Аналіз розв'язків показав, що їх можна розглядати, як математичні моделі реальних об'єктів, ідентифікація яких визначає множину прообразів моделі, яка може включати і прообрази, покладені в основу задач зазначеними вченими і дослідниками.

Наведемо формулювання однієї із задач мовою оригіналу [8]:

«This month's puzzle concerns configurations of 4 distinct points in the plane. Suppose we know the 6 distances between pairs of points only take on two values. We ask for a list of the distinct possible configurations. For each configuration give the number of long distances and the number of short distances (which must sum to 6) and the ratio of the long distance to the short distance».

Схематичне зображення розв'язку задачі у вигляді фігур (configurations) показано на рис. 3.

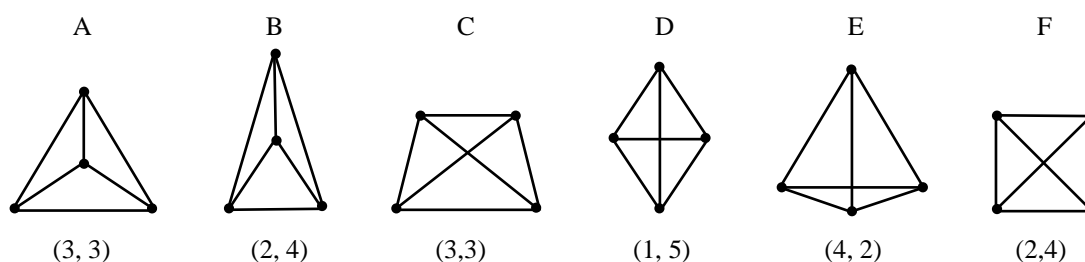


Рис. 3. Схематичне зображення розв'язку задачі

Джерело: розроблено авторами.

Виникає питання – чи можуть ці фігури бути абстрактними моделями реальних об'єктів? Якщо так, то яких об'єктів? Аналізуючи рисунок, ми бачимо, що тільки у фігурах А і В всі 4 точки перетину відрізків є заданими. Інші 4 фігури (С – F) мають ще по одній – п'ятій, точці перетину, яка не є заданою.

Логічно припустити, що ця точка може бути точкою 2D зображення 3D відрізків, які лежать на мимобіжних прямих. Отже, усі фігури на малюнку можна розглядати, як зображення піраміди, тобто 3D об'єкта, на площині. Таким чином, ми розглядаємо їх як моделі, зауваживши, що в умові задачі не вказано, який реальний об'єкт послужив основою для створення конфігурацій.

Перед розробником комп'ютерних ігор або фахівцем з розпізнавання образів при цьому може виникнути такі питання:

- Якими є можливі позиції спостерігача, що бачить у фігурі з рис. 3 правильний тетраедр?

- Які з фігур з рис. 3 можуть мати такий вигляд для спостерігача, що розташований назовні тетраедра?

- Чи є (та який) розв'язок узагальненої задачі – знайти конфігурації чотирьох різних точок на площині, відстані між парами яких приймають інші, ніж два, значення?

- Які розв'язки має аналогічна задача з більшою за 4 заданих точки на площині?
- Якою є 3D геометрична фігура за вказаними на рисунку її 2D зображеннями?

Зауважимо, що відповіді на окремі питання не є тривіальними. Наприклад, на останнє питання є нескінченно багато відповідей. Щоб їх описати, важливо, на наш погляд, визначити напрями пошуку, тобто алгоритми дій.

Якщо 3D геометрична фігура розглядається як тверде тіло, то для її ідентифікації застосовують з додатковими вхідними параметрами так зване «твердотільне» моделювання, яке використовується в різних системах автоматизованого проектування.

Якщо 3D геометрична фігура розглядається як тіло, утворене тільки поверхнями, то для її ідентифікації є сенс застосовувати поверхневе моделювання.

Нарешті, якщо 3D геометрична фігура розглядається як тіло, утворене тільки ребрами (в нашому випадку прямолінійними) то є сенс застосувати каркасне моделювання. Воно є більш простим у комп'ютерній реалізації, але має основний недолік – неоднозначність інтерпретації каркасної моделі. Наприклад, таку неоднозначність можна бачити (рис. 4) навіть у простій моделі куба.

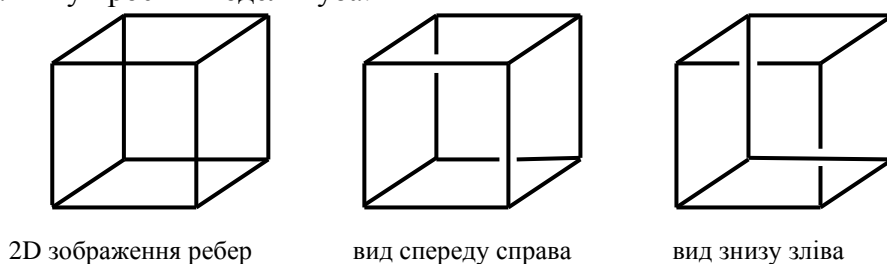


Рис. 4. Інтерпретація каркасної моделі куба

Джерело: розроблено авторами.

Каркасне моделювання наразі є дуже важливим для нас у ситуації війни, коли невеликим дронам потрібно розпізнавати ворожу техніку, зокрема, її каркасні моделі. Наприклад, важливо вміти швидко відтворювати просторовий образ автомобіля баггі – невеликого легкого автомобіля високої прохідності (рис. 5).

У наведеному вище прикладі математичною моделлю слугували геометричні об'єкти. Але під моделлю в широкому сенсі розуміють об'єкти будь-якої природи – матеріальні або абстрактні. Розглянемо приклад математичної моделі алгебраїчної системи, сформульований згаданими дослідниками з IBM Research [7] у наступній задачі.

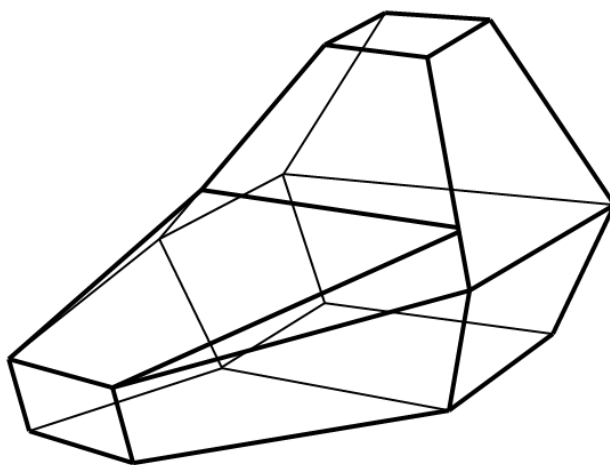


Рис. 5. Фрагмент каркасу автомобіля баггі з виділеними для 3D моделі ребрами

Джерело: розроблено авторами.

Визначити четвірки натуральних чисел (a, b, c, d) , які при заданому натуральному m задовольняють умові

$$a^2 - b^2 = c^2 - d^2 = m.$$

Скільки таких четвірок має бути для цього m ?

Наш досвід роботи з програмістами-початківцями показав, що першою їх думкою було написати код. Але після витрати певного часу на пошук окремих відповідей і за відсутності загальної відповіді (при довільному m) їм було запропоновано шукати нові підходи до вирішення – із застосуванням математичної логіки.

Хоча насправді для загальної відповіді виявилось достатньо шкільного курсу алгебри, а код потрібен хіба що для розкладання числа m на прості множники. Відтак, алгоритм розв'язку для довільного m виявився цікавою для початківців розумовою вправою.

Цей приклад описує алгебраїчну модель, за якою людина з розвинутим абстрактним мисленням може побачити реальні об'єкти. Наведемо ті з них, які знаходяться «на поверхні».

Аналізуючи умову задачі, ми природньо згадуємо формулу площі круга і кільця, а натуральні числа можуть означати можливість вписати ці фігури у певну сітку.

Аналогічно першій задачі перед програмістом може виникнути ряд питань одного алгоритмічного ряду:

- Скільки є вписаних у сітку кілець заданої площі?
- Скільки є вписаних у сітку кілець заданої площі круга (d може бути нулем) (рис. б)?
- Скільки варіантів вписати у сітку вписаний вектор обертанням навколо його початку?
- Скільки вписаних у сітку кілець можна отримати з вписаного у сітку прямокутника, площа якого в π разів більша за площу кільця?

У програмуванні розглянуті абстрактні моделі можуть дати можливість визначити загальний інтерфейс, різні реалізації якого можна створити за допомогою поліморфізма.

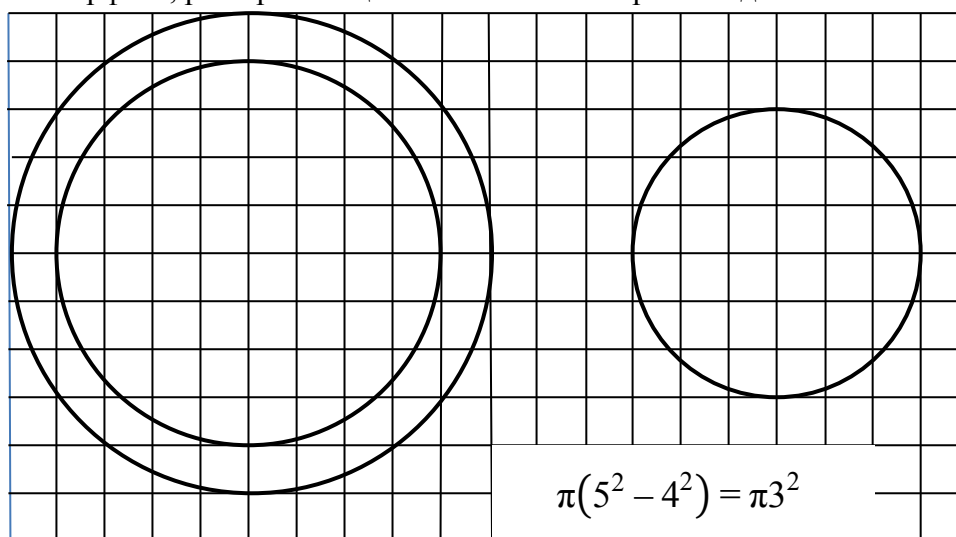


Рис. 6. Вписані у сітку кільце і круг однакових площ

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Результатом нашого дослідження є:

- розширення поняття про математичну модель на прикладах метода дослідження, геометричних конфігурацій, алгебраїчних рівнянь;
- аналіз математичних моделей з визначенням їх характерних рис;
- зазначення можливостей застосування математичних моделей в програмуванні.

Це дозволить формувати, в першу чергу, у програмістів-початківців уміння аналізувати абстрактні математичні об'єкти, розглядаючи їх, як моделі тих чи інших явищ.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання даного дослідження в навчальному процесі майбутніх фахівців з комп'ютерних наук, а саме для:

- розвитку абстрактного (образного і логічного) мислення майбутніх вебдизайнерів, розробників ігрових додатків, фахівців з розпізнавання образів;
- ґрунтовного аналізу завдань, уміння оцінити складність алгоритму;
- пошуку нових підходів до вирішення складних проблем у комп'ютерних науках.

Список використаних джерел

1. Теорія і практика ідентифікації об'єктів управління : монографія / І. Л. Левчук, Г. І. Манко, В. Я. Тришкін, В. І. Корсун. – Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2019. – 203 с.
2. Thacker, B. H. Concepts of Model Verification and Validation / B. H. Thacker, S. W. Doebeling, F. M. Nemez et al. – Los Alamos : LANL, 2004. – 41 p.
3. Штельма, О. М. Математичне моделювання і оптимізація : конспект лекцій / О. М. Штельма. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 56 с.
4. Основи біомедичного радіоелектронного апаратобудування / С. М. Злепко, С. В. Павлов, Л. Г. Коваль, І. С. Тимчик. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 133 с.
5. Бартіш, М. Я. Дослідження операцій / М. Я. Бартіш, І. М. Дудзяний. – Ч. 1 : Лінійні моделі. – Львів : Видавничий центр Львівського національного університету ім. І. Франка, 2007. – 168 с.
6. Тохтамиш, О. М. Порівняльний аналіз характеристик творчого мислення військових та цивільних програмістів / О. М. Тохтамиш, Д. М. Головка // Педагогічний процес: теорія і практика. – 2016. – № 1 (52). – С. 41-45.
7. IBM Research [Electronic resource]. – Access mode: <https://research.ibm.com>.
8. IBM Research [Electronic resource]. – Access mode: <https://research.ibm.com/haifa/ponderthis/challenges/May2006.html>.

References

1. Levchuk, I.L. (2019). *Teoriia i praktyka identyfikatsii ob'ektiv upravlinnia [Theory and practice of identification of management objects]*. DVNZ UDHTU.
2. Thacker, B. H. (2004). *Concepts of Model Verification and Validation*. Los Alamos : LANL.
3. Shtelma, O.M. (2019). *Matematychnye modeliuвання i optymizatsiia [Mathematical modeling and optimization]*. XNUMX.
4. Zlepko, S.M. (2011). *Osnovy biomedychnoho radioelektronnoho aпаратobuduvannya [Basics of biomedical radioelectronic apparatus construction]*. VNTU.
5. Bartish, M. Ya. (2007). *Doslidzhennia operatsii [Operations Research]. Part 1. Liniini modeli. [Linear models]*. Vydavnychiy tsentr Lvivskoho natsionalnoho universytetu im. I. Franka.
6. Tokhtamysh, O.M. (2016). Porivnialnyi analiz kharakterystyk tvorchoho myslennia viiskovykh ta tsyvilnykh prohranmistiv [Comparative analysis of the characteristics of creative thinking of military and civilian programmers]. *Pedahohichnyi protses: teoriia i praktyka – Pedagogical process: theory and practice, 1(52)*, 41-45.
7. IBM Research. <https://research.ibm.com>.
8. IBM Research. <https://research.ibm.com/haifa/ponderthis/challenges/May2006.html>.

Отримано 04.03.2024

UDC 519.711:004.94

Olha Bondar¹, Olexiy Izvalov²

¹PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Technology
Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)
E-mail: bondarkla@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5877-5667>

² PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Technology
Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)
E-mail: alexey@globalgamejam.org. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4935-7153>

MATHEMATICAL MODELS IN COMPUTER SCIENCES

Based on a broad idea of a mathematical model as an abstract object that can be, in particular, a research method, the paper analyzes solutions to several problems proposed by a group of scientists and researchers associated with IBM Research [5].

In the tasks, it was not reported which objects served as the basis for setting the tasks. Therefore, analyzing each solution, we accepted it as a mathematical model of undefined real objects - prototypes of the model.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Therefore, our task was to determine or identify possible real objects-prototypes of the specified mathematical models. It is possible that among them there could be those that served as the basis for setting the tasks.

Our goal was to help, first of all, novice programmers to form and develop imaginative thinking, in particular, the ability to perceive abstract mathematical objects as models of certain real phenomena.

For this purpose, we have provided several options for interpreting the models. In the geometric model, we saw 2D images of certain 3D geometric shapes. This view can be useful for computer game developers or pattern recognition specialists.

In the algebraic model, we saw the possibilities for applying the formulas for the area of a circle and a ring, as well as the possibility of fitting geometric shapes into a certain grid.

The general result of our research is:

- expansion of the concept of a mathematical model using the examples of the operations research method, geometric configurations and algebraic equations;

- analysis of the considered mathematical models with the definition of their characteristic features;

- specifying the possibilities of applying mathematical models in programming.

The practical significance of the obtained results lies in the use of this research in the educational process of future computer science specialists, namely, for:

- development of abstract (figurative and logical), thinking of future Web designers, game application developers, pattern recognition specialists;

- thorough analysis of tasks, the ability to assess the complexity of the algorithm;

- finding new approaches to solving complex problems in computer science.

Keywords: *mathematical modeling; Information Technology; abstract thinking; game applications; pattern recognition.*

Fig.: 6. References: 8.

Артем Волокита¹, Микита Меленчуков²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: artem.volokita@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9069-5544>

²аспірант кафедри обчислювальної техніки,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: melenchukov.nikita@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6615-4306>

**НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ У ВИЯВЛЕННІ АТАК
НА РОЗПОДІЛЕНІ СИСТЕМИ**

Сучасні виклики до обробки великих обсягів інформації вирішуються за допомогою складних розподілених систем, які своєю чергою потребують кіберзахисту, що дозволяє керувати ризиками безпеки, такими як заволодіння інформацією, шпигунства, зниження продуктивності систем та ін. У цій статті зроблено огляд деяких засобів виявлення кібератак, які зокрема застосовують машинне навчання, наведені їхні переваги, недоліки, методи роботи, вразливості та підходи до їх захисту.

Аналіз атак проти засобів захисту на основі машинного навчання, які використовують підхід детекції аномалій, показав що існують слабкі місця, що потребують додаткового захисту, наприклад, розподілені в часі атаки можуть адаптуватись до допустимих діапазонів відхилення показників мережі. Виконано огляд механізмів забезпечення стійкості систем захисту до таких впливів, а саме додавання різноманітних шумів під час навчання, зменшення інтервалів значень параметрів системи, варіації донавчання моделі на оманливих даних, використання спеціальних класифікаторів.

Ключові слова: системи виявлення атак; нейронні мережі; розподілені системи; детекція аномалій; машинне навчання.

Табл.: 5. Бібл.: 33.

Актуальність теми дослідження. З постійним технологічним розвитком людства стають дедалі більше поширенішими розподілені системи, що здатні обробляти великі об'єми даних та виконувати складні задачі. Разом із цим розвиваються і методи атак на ці системи, метою яких може бути заволодіння даними, захоплення контролю над системою, вплив на продуктивність системи тощо. У цій статті зроблено огляд деяких засобів виявлення кібератак, які зокрема застосовують машинне навчання, наведені їхні переваги, недоліки й методи роботи.

Постановка проблеми. Атаки на розподілені системи здатні заподіяти великої шкоди, наприклад, заволодіння конфіденційною інформацією, отримання доступу до керування, зниження ефективності роботи системи. Застосування систем виявлення атак (СВА) є ефективним підходом для детекції атак на розподілені системи. У зв'язку з різноманітністю засобів захисту за швидкодією, точністю, варіацією типів атак, методами роботи із вхідними даними та різноманітністю цих даних, виникає необхідність в огляді наявних видів засобів виявлення атак, їхніх слабких та сильних сторін, способів роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системам виявлення атак присвячені статті [1]-[18]. У статті [1] класифіковано такі системи за методами та підходами детекції і розглянуто утиліти з відкритим кодом Snort та ClamAV з метою порівняння їх принципів роботи. Автори статті [2] розглянули застосування класифікатора на основі SVM та k-середніх з метою покращення точності виявлення кібератак та зниження кількості неправильних позитивних спрацювань тривоги. Було оглянуто можливі види атак, яким допомагає запобігти обране рішення, способи пришвидшити перевірку трафіку, та проаналізовано отримані результати, описано переваги та недоліки застосованого методу. У статті [3] розглянуто виявлення аномальної поведінки у розподіленій системі за допомогою використання згорткових нейронних мереж (CNN) та Random Forest. Автори пропонують свій алгоритм TR-IDS для попередньої підготовки, обробки та аналізу даних що базується на моніторингу даних інтернет пакетів та їх заголовків. Також надано схему розробленої Text-CNN моделі що використовується із метою виокремлення ознак для подальшої класифікації трафіку за допомогою Random Forest. В межах статті [4] розглянуто використання CNN моделі для виявлення атак на основі даних системи (логи). Навчання

моделі було виконано на базі датасетів NGIDS-DS та ADFA-LD. Основа частина статті присвячена питанню аналізу дуже великого обсягу інформації з метою виявлення атаки, опису критеріїв відбору даних для перевірки згортковою мережею, проектуванню самої моделі CNN та подальшого аналізу отриманих результатів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У результаті аналізу досліджень і публікацій показано, що існує необхідність об'єднання даних різних систем виявлення атак, які використовуються на різних шарах кіберзахисту. Є потреба в дослідженні доцільності використання моделей машинного навчання, нейронних мереж, базуючись на доступних вхідних даних і вимогах до точності та швидкодії.

Мета дослідження. Метою роботи є огляд систем виявлення атак, порівняння переваг та недоліків методів детекції атак на різних рівнях розподілених систем, а також аналіз підходів до використання різноманітних моделей машинного навчання для покращення точності та ефективності ідентифікації кібератак.

Виклад основного матеріалу. Система виявлення атак (intrusion detection system, IDS) – це програмна чи апаратна система що націлена на виявлення кібератак з метою підтримки безпеки комп'ютерної системи [1]. Завдяки різним підходам до моніторингу IDS дозволяє виявляти шкідливий трафік чи використання комп'ютерних ресурсів, щоб ідентифікувати атаку. У сучасному світі для захисту розподілених мереж застосовують комплексні підходи що поєднують у собі застосування шифрування, управління ідентифікацією та доступом, моніторингу та детекції, наборів інструментів, що допомагають відповідати стандартам безпеки.

Для впровадження детекції атак на розподілені системи із використанням штучного інтелекту аналізують різні параметри таких систем. Це можуть бути певні параметри в пакетах даних, тому при аналізі заголовків, протоколів, кодувань, часу відправлення, відправника або отримувача застосовують метод опорних векторів (SVM), метод k-середніх, алгоритм нечітких C-середніх [2]. Таку модель автори називають багатоядерним алгоритмом k-середніх із неповним ядром (MKKM-IC). Запропоноване рішення було протестовано на трьох датасетах – NSL-KDD, UNSW, AWID. У цих датасетах дані містять атрибути протоколів пакетів що передавались у мережі. На їх основі моделі нейронних мереж навчають виявляти DDoS атаки, ін'єкції, заволодіння доступом до адміністрування, імітації. Порівнюючи точності (precision) виявлення кібератак на розподілену систему найкраще себе показали моделі MKKM-IC та Змішана Модель Гаусса(GMM) із результатами 71-88 %, а найгірше алгоритм пікових щільностей та k-середніх, із точністю 55-72 %. Результати експериментів статті [2] відображено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння точності виявлення атак нейронними мережами на різних датасетах

Алгоритм	Precision(%) для NSL-KDD датасету	Precision(%) для UNSW датасету	Precision(%) для AWID датасету
МККМ-ІС	81,65	77,27	88,24
Density peaks	68,18	60,18	72,73
Алгоритм k-середніх	59,13	55,56	72,16
Змішана модель Гаусса(GMM)	76,19	71,17	85,71

Джерело: таблиця складена на основі даних [2].

У статті Мін та інших [3] для аналізу пакетів даних застосовують глибокі нейронні мережі, наприклад CNN, RNN, LSTM. Нейромережею CNN аналізувались дані, отримані поєднанням вмісту пакетів, та виокремлювались ознаки на основі яких, за допомогою моделі random-forest, виявлялись атаки. Точність (accuracy) виявлення атак такого підходу досягає 99,13 %.

У іншому дослідженні виявлення атак на цьому рівні, автори [5] пропонують застосовувати для навчання датасети, що містять дані HTTP сесій – KF-ISAC, CSIC-2010, CICIDS2017. Використовують комбінацію довгої короткочасної пам'яті (LSTM) і згорткової мережі (CNN), CNN-LSTN та окремо глибоку нейронну мережу (DNN). Поєднання таких

підходів дозволило виявляти кібератаки із точністю (precision) 92,49 % для CNN-LSTM, 88,32 % для LSTM-CNN, та 93 % для DNN. Автори наголошують на необхідності постійного продовження донавчання моделі на реальному трафіку для зниження рівня помилкових позитивних ідентифікацій загроз. До недоліків такої системи слід віднести проблемність роботи із зашифрованими даними, аналіз персональних даних без деперсоніфікації, необхідність обробки великих обсягів інформації, що значно впливає на продуктивність.

При моніторингу поточкових атак використовують як SVM, random forest так і глибокі нейронні мережі. Все залежить від способу обробки вхідних даних. Для перевірки моделей використовують такі датасети як KDD99 чи NSL-KDD. Виокремлення трафіку у групи дозволяє покращити рівень виявлення [5]. Поточкові дані складно одразу використовувати у нейронній мережі, тому застосовують різні методи для підготовки та виокремлення даних за ознаками. Розробники NSL-KDD пропонують декілька підходів до тестування СВА – на повному датасеті чи на датасеті без дій що зустрічаються дуже часто. Такий відбір можна робити і за допомогою SVM, дерева рішень, найвного алгоритму Баєса чи за допомогою К-середніх [6]. При виборі нейронних мереж важливим є не тільки точність виявлення атак, а і швидкодія моделі, яка іноді є критичною. Автори статті [7] для навчання пропонують використовувати датасети CICIDS-2017 та CSE-CICIDS2018 що складаються із перехоплених пакетів із мережевого трафіку. Для подальшої обробки інформації у контексті мережевих потоків, виконується виділення ознак, за якими можна аналізувати саме поточкову діяльність (таблиця 2).

Таблиця 2 – Виділення ознак потоку для подальшого аналізу нейронними мережами

Ознаки	Трактування
Fl-dur	Тривалість потоку
Fl-iat-max	Максимальний час між потоками
Tot-fw-pk	Об'єднання пакетів у напрямку передачі
Tot-l-fw-pkt	Загальний розмір пакета що відправляється
Tot-bw-pk	Загальна кількість пакетів що приймаються
Fw-pkt-l-min	Найменший розмір пакета що відправляється
Fw-pkt-l-avg	Середній розмір пакета що відправляється
Fw-iat-min	Довжина найменшого проміжку часу між надсиланням двох пакетів
Bw-iat-tot	Загальний час прийняття всіх пакетів
Bw-iat-avg	Середній час прийняття пакетів
Bw-iat-std	Середній час надсилання на прийняття двох послідовних пакетів
Bw-iat-max	Найбільший період очікування між прийняттям двох пакетів
Bw-iat-min	Найменший період очікування між прийняттям двох пакетів

Джерело: дані взяті на основі інформації викладеної у статті [7].

Наступним кроком після виділення ознак потоку, порівнюються точності (accuracy) моделей DBN (95 %), DNN (90,25 %), LSTM (96,2 %), CNN (96 %) та власного рішення HCRNN (97,75 %) утвореного поєднанням CNN, RNN та DL. Автори статті наголошують на необхідності для нейронної мережі бути пристосованою до обробки великих обсягів інформації та важливого впливу попередньої обробки інформації з метою виокремлення ознак на кінцевий рівень точності виявлення загроз.

Використання правил для виявлення атак на систему може давати велику кількість помилкових тривог на відсутні атаки. Поліпшити цю ситуацію та знизити рівень неправильних спрацювань СВА можна за допомогою комбінування правил та нейронних мереж [8]. Досягнути таких результатів можна застосовуючи KNN, CNN, DNN. Також застосовують поєднання детекції на основі логів та аналізу системних викликів за допомогою CNN моделі [4].

Огляд сучасних новітніх досягнень доступних на ринку. Сучасні популярні рішення для роботи із розподіленими системами пропонують власні набори інструментів для виявлення атак. Пропозиції для моніторингу та детекції таких компаній як Oracle, AWS, Azure, DigitalOcean, Cisco, IBM мають схожості та особливості. СВА що продаються

цими компаніями (табл. 3), являють собою нашарування декількох різних систем які забезпечують спостереження і виявлення на різних рівнях. Це може бути моніторинг на основі керування реакцією на підозрілі події чи інциденти, або ж аналіз певних груп трафіку.

Таблиця 3 – Засоби для моніторингу та детекції атак на розподілені системи

Компанія	Назва продукту	Особливості	Спільні можливості
Cisco	Cisco Stealthwatch, Cisco Identity Services Engine, Cisco Umbrella, Cisco Threat Response, Cisco Advanced Malware Protection, Cisco Talos Intelligence Group	Виявлення загроз для кінцевих пристроїв	Система моніторингу
IBM	IBM QRadar, IBM Resilient Incident Response Platform, IBM Cloud Pak for Security, IBM X-Force Threat Management, IBM Trusteer, IBM Cloud Activity Tracker, IBM Security MaaS360	Керування реакціями на події та інциденти, обмін інформацією про загрози	
Oracle	OCI Monitoring, OCI Logging, OCI Security Monitoring and Analytics	Детекція загроз для хмарних середовищ	
Amazon	Amazon CloudWatch, AWS X-Ray, Amazon CloudTrail, Amazon GuardDuty, Amazon Inspector, AWS Security Hub, Amazon Macie	Система аналізу та виявлення потенційних проблем у безпеці. Система виявлення шахрайства.	
Azure	Azure Monitor, Azure Security Center, Azure Sentinel, Azure Network Watcher, Azure Resource Graph, Azure Service Health	Система управління подіями та інцидентами, рекомендації з безпеки для хмарних середовищ	
DigitalOcean	DigitalOcean Monitoring and Alerts	Система аудиту хмарних середовищ.	

Джерело: розроблено авторами.

Основні відмінності між наявними рішеннями компаній що розглядаються, полягають у різних цілях на яких фокусуються системи захисту, для Cisco це мережева безпека, для Oracle – безпека баз даних, IBM спеціалізується на рішеннях що аналізують та обробляють дані за допомогою штучного інтелекту. Azure та AWS пропонують широкий спектр різноманітних служб для покращення захищеності системи. Крім цього рішення кожної з вищезгаданих компаній націлене на використання всередині екосистеми та мають різний рівень складності інтеграції зі сторонніми продуктами.

Система що пропонується компанією IBM так і називається IDS. Існує можливість написання власних правил задаючи порогові значення параметрів для виявлення таких небажаних втручань як атака отруєння адреси, перенаправлення ICMP повідомлення, атака пошкодженими пакетами, атаку ping-of-death, TCP ACK storm та інші [9]. Навіть якщо не створити власні правила для виявлення атак, IBM IDS містить попередній набір правил для детекції поширених видів кібератак. IBM використовує машинне навчання для виявлення аномалій що допомагає помітити атаку на систему.

Microsoft Azure дозволяє збирати такі дані про роботу системи як логи про налаштування і трафік системи, записувати інтернет-трафік [10]. Подальший аналіз з метою виявити атаку можна робити вбудованим Azure Firewall у комбінації із Threat Intelligence використовуючи базу шкідливих IP та доменів. Для детекції атак за допомогою машинного навчання Azure пропонує використовувати детектор аномалій. Його можна налаштувати для спостереження за динамікою зміни від однієї до 300 змінних. Такий ефект досягається застосуванням графової нейронної мережі(GNN) із шаром уваги. Крім цього Azure дозволяє використовувати сторонні рішення IDS для підвищення рівня безпеки системи.

Amazon AWS пропонує використовувати їх рішення Amazon GuardDuty [11] що поєднує у собі виявлення аномалій, моніторинг мережі, ідентифікація шкідливих файлів. Для визначення атаки сервіс використовує аналіз логів системи, DNS, віртуальної приватної хмари(VPC), звертає увагу на атипичну геолокацію чи час активності, незвичні виклики API. Amazon GuardDuty виявляє шкідливий трафік ідентифікуючи аномалії за допомогою машинного навчання (AIDS) а також використовуючи шаблони для виявлення атак (SIDS).

Рішення також дозволяє користувачу створювати власні правила для виділення кібератак і може бути поєднаним з іншими наявними рішеннями з AWS marketplace.

Своїм користувачам Digital Ocean рекомендує використовувати Suricata [12] – високопродуктивну, систему для аналізу мережі з відкритим сирцевим кодом. При налаштуванні Suricata користувач має можливість налаштувати шаблони за якими буде виконувати виявлення атак. Ці шаблони складаються з опису бажаної дії яку треба виконати у випадку коли шаблон підійшов, а також з таких ознаки як хост, IP адреса, порт, протокол, напрямок трафіку, регулярні висловлювання для детекції пакетів по вмісту. Також доступний стандартний набір правил для виявлення підозрілого трафіку по шаблону.

У Oracle, Intrusion Detection System входить до Oracle Session Border Controller (SBC) [13] і дозволяє ідентифікувати кібератаки за допомогою виявлення аномалій (AIDS). Детекція атак виконується зважаючи на оцінку надійності вузлів, кількість спрацьованих тривог на проміжку часу, цілісності пакета, кількості активних сесій, середньої тривалості зв'язку. Крім цього, налаштовуються діапазони допустимих значень параметрів сесії, наприклад значення максимальної вхідної/вихідної швидкості, мінімальний процент успішних відповідей, час до відновлення сесії у випадку її призупинення через порушення правил.

Компанія Cisco пропонує своїм клієнтам різні продукти для захисту свої розподілених систем що відрізняються один від одного своєю складністю, та підходом до роботи. Так, Cisco Umbrella поєднує у собі фаєрвол, моніторинг вразливих застосунків, захист на рівні DNS, можливість збирати логи та налаштовувати правила обробки трафіку. Іншим рішенням компанії є Cisco XDR. Його перевагою є відносно легке впровадження у порівнянні з іншими IDS рішеннями, а також можливість захистити систему одразу на 4-х рівнях – на рівні мережі, користувача чи кінцевої точки, хмари та на рівні застосунків і ідентифікації. Можливість збирати логи із декількох рівнів системи, та обробляти їх разом, зіставляючи події один з одним, дозволяє краще оцінювати процеси що відбуваються у мережі. Такі великі обсяги інформації Cisco XDR аналізує за допомогою машинного навчання.

Отже, СВА мають можливість аналізувати різні ознаки. Для поліпшення роботи СВА використовують машинне навчання. Атаки на розподілені системи виконуються на різних рівнях, тому для їх виявлення необхідно аналізувати різні дані для обробки яких оптимальними є різні моделі нейронних мереж. Здебільшого (IBM, Azure, AWS, Oracle) при виявленні атак за допомогою машинного навчання застосовують детекцію аномалій у системах. Такий підхід має свої переваги та недоліки (табл. 4).

Таблиця 4 – Переваги та недоліки підходу до детекції атак на розподілені системи на основі виявлення аномалій

Переваги підходу детекції аномалій	Недоліки підходу детекції аномалій
Завдяки порівнянню повсякденної роботи системи із незвичайними відхиленнями, дозволяє виявляти найновіші види атак, включаючи атаки що використовують вразливості нульового дня [14]	Вимогливість до обчислювальних ресурсів
Здатність до розширення [15]	Необхідність великого об'єму даних для забезпечення достатнього рівня детекції
Здатність до обробки великих обсягів даних [16]	Наявність як позитивних, так і негативних помилкових виявлень втручань
Можливість виявлення атак у реальному часі	Питання конфіденційності даних і етики
Можливість проведення постійного донавчання та покращення рівня детекції	Вразливість до змагального типу атак на систему. До них відносять атаки отруєння та атаки ухилення
Низький рівень помилкових позитивних виявлень атак із можливістю його подальшого зниження	
Здатність виявляти втручання маючи обмежений або неповний об'єм даних, за відсутності інформації про структуру мережі [15]	
Висока точність(асигасу) виявлення втручань [7], [14]-[16], [17]	

Джерело: розроблено авторами.

Попри те, що метод виявлення аномалій є найпоширенішим серед застосунків що використовують машинне навчання у системах СВА, цей підхід є вразливим до атак змагального типу, що охоплюють застосування оманливих, отруєних даних. Пошук нових варіацій вторгнень що належать до цього типу, та захистів від них постійно продовжується на сьогоднішній час. Перелік деяких рішень, разом зі статтями, у яких вони описані, наведений у таблиці 5.

Таблиця 5 – Наявні види атак змагального типу що застосовуються проти моделей що працюють на основі виявлення аномалій, та наявні способи захисту від них

Атаки змагального типу	Спосіб адаптації аномальних детекторів до такого виду атак
Атака за допомогою мапи помітності на основі якобіана (JSMA) [18]. При її здійсненні складається мапа чутливості вхідних параметрів, за допомогою якої визначається зміна яких параметрів дозволить змінити кінцеву класифікацію даних	Звуження допустимих діапазонів "безпечних" значень які можуть набувати параметри [19]
	Донавчання моделей на датасети що містять дані отримані при виконанні змагальних атак [20]
	Впровадження методу "Дистиляції", при якому відбувається розділення початкової нейронної мережі на дві, при такому підході друга мережа приймає ймовірнісний вектор класифікації та робить подальший висновок чи відбувається атака [21]
Метод швидкого градієнта (FGSM) - атаки при яких максимізується значення функції втрат із метою зміни результату класифікації. Для прикладу додавши до зображення панди непомітні для людського ока шуми, можна отримати нове зображення панди яке буде класифікуватись як зображення гібона [22]	Використання шару маскувального градієнта (GCM) який буде модифікувати дані що проходять крізь нього, тим самим приховуючи градієнт [23]
	Донавчання моделей на датасети що містять дані отримані при виконанні змагальних атак [22]
	Використання автокодувальників для забезпечення виявлення оманливих даних без залучення окремих датасетів із даними змагальних атак [24]
DeepFool - для атаки ітеративним підходом знаходиться напрямок найменших змін вхідних даних з метою зміни кінцевої класифікації [25]	Використання Minimax захисту що застосовує генератор оманливих даних (GAN) та додатковий класифікатор для визначення підробок [26]
	Застосування аналізу Фур'є на вхідних зображеннях та мапах параметрів [27]
	Додавання шуму [28]
Атака Carlini & Wagner-а у якій знаходяться найменші необхідні модифікації для зміни класифікації моделі враховуючи умови обмеження змін вхідних параметрів класифікатора [29]	Стиснення вхідних даних, таке як розмиття зображення, зменшення глибини кольорів [30]
	Застосування генератора оманливих даних (GAN) для підготовки моделі до виявлення оманливих даних [31]
	Створення надійних та стійких класифікаторів за допомогою глибокого навчання на основі k-найближчих сусідів (DkNN) [32], [33]

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Огляд наявних експериментів із застосування ШІ з метою покращення точності детекції атаки за допомогою СВА, показав які методи виявлення вторгнень є ефективними, яка проблематика цієї теми, та у якому напрямку варто вести дослідження.

Застосування СВА у різних шарах системи, дозволяє виявляти такі атаки як SQL вставка, отримання прав адміністратора, отримання доступу до вузла, DDoS, Probe. Це можна зробити аналізуючи логи, або ж мережеві пакети у випадку SQL вставки, чи застосовуючи моніторинг інтернет-трафіку при DDoS атаці. З урахуванням тенденції зростання кількості видів атак на розподілені системи та збільшення обсягів інформації що обробляється, використання машинного навчання у СВА стає дедалі привабливішим. Штучний інтелект можна залучати до відбору необхідних ознак для аналізу, виявлення втручань, зниження рівня неправильних детекцій атак, покращення точності їх розпізнавання. Можливість донавчати моделі на нових даних є суттєвою перевагою через малу кількість наявних тестових датасетів на тему атак на розподілені системи.

Визначено що детекція аномалій є найпоширенішим підходом до виявлення атак із використанням машинного навчання на ринку комерційних продуктів. Аналіз ефективних атак проти моделей що базуються на детекції аномалій, показав де у працюючих на основі такого ж принципу СВА, доцільно шукати слабкі місця, як можна зробити системи виявлення безпечнішими. Підвищити успішність втручання у розподілену систему можна за допомогою знаходження допустимих діапазонів відхилення показників мережі та адаптувавши атаку до них. Дізнатись який є простір для змін поведінки користувача аби не бути класифікованим як загроза можна за допомогою використання методів JSMA, FGSM, DeepFool, Carlini & Wagner-а. Зробити СВА що функціонує на основі детекції аномалій стійкою до таких впливів, можна по-різному. Наприклад додаванням різноманітних шумів під час навчання, зменшенням інтервалів допустимих значень параметрів системи, варіаціями донавчання СВА на оманливих даних, використанням спеціальних класифікаторів таких як DkNN.

Зважаючи на активний розвиток теми атак на системи аномального виявлення (наведені методи втручання та захист від них описані у 2015-2023 роках), обраний напрямок є перспективним для подальших досліджень. Це може бути інтеграція у СВА алгоритмів захисту від атак змагального типу які застосовуються у моделях що розпізнають зображення. Також варто спробувати оптимізувати швидкодію та ефективність втручань і їх запобіжників, наприклад реалізація атаки Carlini & Wagner-а вимагає суттєвих додаткових обчислювальних можливостей для її здійснення, а різноманітні варіації додавання шумів [23], [28], [30] не є ефективними проти всіх видів атак змагального типу.

Список використаних джерел

1. Intrusion detection system: A comprehensive review / H.-J. Liao, C.-H. R. Lin, Y.-C. Lin, K.-Y. Tung // *Journal of Network and Computer Applications*. – 2013. – Т. 36, № 1. – С. 16-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2012.09.004>.
2. A multiple-kernel clustering based intrusion detection scheme for 5G and IoT networks / N. Hu, Z. Tian, X. Du, H. Lu // *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. – 2021. – № 12(11). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13042-020-01253-w>.
3. TR-IDS: Anomaly-Based Intrusion Detection through Text-Convolutional Neural Network and Random Forest / E. Min, J. Long, Q. Liu, J. Cui, W. Chen // *Security and Communication Networks*. – 2018. – С. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4943509>.
4. Tran, N. N. An Approach for Host-Based Intrusion Detection System Design Using Convolutional Neural Network / N. N. Tran, R. Sarker, J. Hu // *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. – Cham, 2018. – Pp. 116-126. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90775-8_10.
5. Kim A. AI-IDS: Application of Deep Learning to Real-Time Web Intrusion Detection / A. Kim, M. Park, D. Hoon Lee // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – Pp. 70245-70261. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2986882>.
6. Intrusion detection based on K-Means clustering and Naïve Bayes classification / Z. Muda, W. Yassin, M. N. Sulaiman, N. I. Udzir // *2011 7th International Conference on IT in Asia (CITA) (Sarawak, Malaysia, 12-13. 07. 2011 p.)*. – 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/cita.2011.5999520>.
7. Khan M. A. HCRNNIDS: Hybrid Convolutional Recurrent Neural Network-Based Network Intrusion Detection System / M. A. Khan // *Processes*. – 2021. – Vol. 9, № 5. – Pp. 834. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9050834>.
8. Use of machine learning in big data analytics for insider threat detection / M. Jay Mayhew, M. Atighetchi, A. Adler, R. Greenstadt // *MILCOM 2015 - 2015 IEEE Military Communications Conference (Tampa, FL, USA, 26-28 October 2015)*. – 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/milcom.2015.7357562>.
9. IBM. i Version 7.2 Security Intrusion detection [Electronic resource]. – Access mode: https://www.ibm.com/docs/en/ssw_ibm_i_72/rzaub/rzaubpdf.pdf.

10. Baldwin M. Security Control: Network Security [Electronic resource]. – Access mode: <https://learn.microsoft.com/en-us/security/benchmark/azure/security-control-network-security>.
11. Amazon. Amazon GuardDuty features [Electronic resource]. – Access mode: <https://aws.amazon.com/guardduty/features/>.
12. Camisso J. Understanding Suricata Signatures [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/understanding-suricata-signatures>.
13. Oracle. Oracle intrusion detection system [Electronic resource]. – Access mode: https://docs.oracle.com/cd/E95618_01/html/sbc_scz810_security/GUID-73A32803-097C-496F-9709-7B51CF54382B.htm#Intrusion-Detection-System.
14. Utilising Deep Learning Techniques for Effective Zero-Day Attack Detection / H. Hanan, R. Atkinson, C. Tachtatzis, J.-N. Colin, E. Bayne, X. Bellekens // *Electronics*. – 2020. – Vol. 9, № 10. – C. 1684. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9101684>.
15. Network intrusion detection system for DDoS attacks in ICS using deep autoencoders / I. Ortega-Fernandez, M. Sestelo, J. C. Burguillo, C. Piñón-Blanco // *Wireless Networks*. – 2023. – January. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11276-022-03214-3>.
16. Intrusion detection model using machine learning algorithm on Big Data environment / S. M. Othman, F. M. Ba-Alwi, N. T. Alsohybe, A. Y. Al-Hashida // *Journal of Big Data*. – 2018. – Vol. 5, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-018-0145-4>.
17. CNN-Based Network Intrusion Detection against Denial-of-Service Attacks / J. Kim, J. Kim, H. Kim, M. Shim, E. Choi // *Electronics*. – 2020. – Vol. 9, № 6. – P. 916. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9060916>.
18. Model Evasion Attack on Intrusion Detection Systems using Adversarial Machine Learning / Md. A. Ayub; W. A. Johnson; D. A. Talbert; A. Siraj // 2020 54th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS) (Princeton, NJ, USA, 18-20 March 2020). – 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ciss48834.2020.1570617116>.
19. Evasion Attacks against Machine Learning at Test Time / B. Biggio, I. Corona, D. Maiorca, B. Nelson, N. Srndic, P. Laskov, G. Giacinto, F. Roli // *Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. – 2013. – Pp. 387-402. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-40994-3_25.
20. Secure Kernel Machines against Evasion Attacks / Paolo Russu, Ambra Demontis, Battista Biggio, Giorgio Fumera, Fabio Roli // *CCS'16: 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (Vienna Austria. – New York, 2016)*. – 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2996758.2996771>.
21. Distillation as a Defense to Adversarial Perturbations Against Deep Neural Networks / N. Papernot, P. McDaniel, X. Wu, S. Jha, A. Swami // 2016 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP) (San Jose, 22-26. 05. 2016). – 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/sp.2016.41>.
22. Goodfellow, I. J. Goodfellow, I. J. Explaining and Harnessing Adversarial Examples [Electronic resource] / I. J. Goodfellow, J. Shlens, C. Szegedy. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1412.6572>.
23. Gradient Concealment: Free Lunch for Defending Adversarial Attacks [Electronic resource] / S. Pei, J. Sun, X. Zhang, G. Meng. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/2205.10617>.
24. Meng, D. MagNet: A Two-Pronged Defense against Adversarial Examples / D. Meng, H. Chen // *CCS '17: 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (Dallas Texas USA)*. – New York, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1145/3133956.3134057>.
25. Moosavi-Dezfooli, S.-M. DeepFool: A Simple and Accurate Method to Fool Deep Neural Networks / S.-M. Moosavi-Dezfooli, A. Fawzi, P. Frossard // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (Las Vegas, 27-30. 06. 2016). – 2016. – DOI: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.282>.
26. Lindqvist, B. Minimax defense against gradient-based adversarial attacks [Electronic resource] / B. Lindqvist, R. Izmailov. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/2002.01256>.
27. SpectralDefense: Detecting Adversarial Attacks on CNNs in the Fourier Domain [Electronic resource] / P. Harder, F.-J. Pfreundt, M. Keuper, J. Keuper. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/2103.03000>.

28. Kwon, H. AdvGuard: Fortifying Deep Neural Networks against Optimized Adversarial Example Attack / H. Kwon, J. Lee // *IEEE Access*. – 2020. – P. 1. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3042839>.

29. Carlini N. Towards Evaluating the Robustness of Neural Networks / N. Carlini, D. Wagner // 2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP) (San Jose, 22- 26. 05. 2017). – 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/sp.2017.49>.

30. Xu, W. Feature Squeezing Mitigates and Detects Carlini/Wagner Adversarial Examples [Electronic resource] / W. Xu, D. Evans, Y. Qi. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1705.10686>.

31. Samangouei, P. Defense-GAN: Protecting Classifiers Against Adversarial Attacks Using Generative Models [Electronic resource] / P. Samangouei, M. Kabkab, R.Chellappa. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1805.06605>.

32. Deep k-Nearest Neighbors: Towards Confident, Interpretable and Robust Deep Learning [Electronic resource] / Nicolas Papernot, Patrick McDaniel – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1803.04765>.

33. Adversarial-Aware Deep Learning System Based on a Secondary Classical Machine Learning Verification Approach / M. Alkhowaiter, H. Kholidy, M. A. Alyami, A. Alghamdi, C. Zou // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, № 14. – P. 6287. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23146287>.

References

1. Liao, H.J., Lin, C.H.R., Lin, Y.C., & Tung, K.Y. (2013). Intrusion detection system: A comprehensive review. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(1), 16-24.

2. Hu, N., Tian, Z., Lu, H., Du, X., & Guizani, M. (2021). A multiple-kernel clustering based intrusion detection scheme for 5G and IoT networks. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 1-16.

3. Min, E., Long, J., Liu, Q., Cui, J., & Chen, W. (2018). *TR-IDS: Anomaly-based intrusion detection through text-convolutional neural network and random forest*. Security and Communication Networks.

4. Tran, N.N., Sarker, R., & Hu, J. (2018). An approach for host-based intrusion detection system design using convolutional neural network. In *Mobile Networks and Management: 9th International Conference, MONAMI 2017, Melbourne, Australia, December 13-15, 2017, Proceedings 9* (pp. 116-126). Springer International Publishing.

5. Kim, A., Park, M., & Lee, D. H. (2020). AI-IDS: Application of deep learning to real-time Web intrusion detection. *IEEE Access*, 8, 70245-70261.

6. Yassin, W., Udzir, N.I., Muda, Z., & Sulaiman, M.N. (2013). Anomaly-based intrusion detection through k-means clustering and naives bayes classification.

7. Khan, M.A. (2021). HCRNNIDS: Hybrid convolutional recurrent neural network-based network intrusion detection system. *Processes*, 9(5), 834.

8. Mayhew, M., Atighetchi, M., Adler, A., & Greenstadt, R. (2015, October). Use of machine learning in big data analytics for insider threat detection. In *MILCOM 2015-2015 IEEE Military Communications Conference* (pp. 915-922). IEEE.

9. IBM. (2013). Security Intrusion detection. IBM i Version 7.2. https://www.ibm.com/docs/en/ssw_ibm_i_72/rzaub/rzaubpdf.pdf.

10. Microsoft & Baldwin, M. (2022). Security Control: Network Security. [learn.microsoft.com](https://learn.microsoft.com/en-us/security/benchmark/azure/security-control-network-security). <https://learn.microsoft.com/en-us/security/benchmark/azure/security-control-network-security>.

11. Amazon. (2024). Amazon GuardDuty features. [aws.amazon.com](https://aws.amazon.com/guardduty/features/). <https://aws.amazon.com/guardduty/features/>.

12. Digitalocean & Camisso, J. (2021). Understanding Suricata Signature. [www.digitalocean.com](https://www.digitalocean.com/community/tutorials/understanding-suricata-signatures). <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/understanding-suricata-signatures>.

13. Oracle. (2024). Oracle Intrusion Detection System. [docs.oracle.com](https://docs.oracle.com/cd/E95618_01/html/sbc_scz810_security/GUID-73A32803-097C-496F-9709-7B51CF54382B.htm#Intrusion-Detection-System). https://docs.oracle.com/cd/E95618_01/html/sbc_scz810_security/GUID-73A32803-097C-496F-9709-7B51CF54382B.htm#Intrusion-Detection-System.

14. Hindy, H., Atkinson, R., Tachtatzis, C., Colin, J. N., Bayne, E., & Bellekens, X. (2020). Utilising deep learning techniques for effective zero-day attack detection. *Electronics*, 9(10), 1684.

15. Ortega-Fernandez, I., Sestelo, M., Burguillo, J. C., & Pinon-Blanco, C. (2023). Network intrusion detection system for DDoS attacks in ICS using deep autoencoders. *Wireless Networks*, 1-17.
16. Othman, S.M., Ba-Alwi, F.M., Alsohybe, N.T., & Al-Hashida, A.Y. (2018). Intrusion detection model using machine learning algorithm on Big Data environment. *Journal of big data*, 5(1), 1-12.
17. Kim, J., Kim, J., Kim, H., Shim, M., & Choi, E. (2020). CNN-based network intrusion detection against denial-of-service attacks. *Electronics*, 9(6), 916.
18. Ayub, M.A., Johnson, W.A., Talbert, D.A., & Siraj, A. (2020, March). Model evasion attack on intrusion detection systems using adversarial machine learning. In *2020 54th annual conference on information sciences and systems (CISS)* (pp. 1-6). IEEE.
19. Biggio, B., Corona, I., Maiorca, D., Nelson, B., Šrndić, N., Laskov, P., ... & Roli, F. (2013). Evasion attacks against machine learning at test time. In *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases : European Conference, ECML PKDD 2013, Prague, Czech Republic, September 23-27, 2013, Proceedings, Part III 13* (pp. 387-402). Springer Berlin Heidelberg.
20. Russu, P., Demontis, A., Biggio, B., Fumera, G., & Roli, F. (2016, October). Secure kernel machines against evasion attacks. In *Proceedings of the 2016 ACM workshop on artificial intelligence and security* (pp. 59-69).
21. Papernot, N., McDaniel, P., Wu, X., Jha, S., & Swami, A. (2016, May). Distillation as a defense to adversarial perturbations against deep neural networks. In *2016 IEEE symposium on security and privacy (SP)* (pp. 582-597). IEEE.
22. Goodfellow, I. J., Shlens, J., & Szegedy, C. (2014). Explaining and harnessing adversarial examples. arXiv preprint arXiv:1412.6572.
23. Pei, S., Sun, J., Zhang, X., & Meng, G. (2022). *Gradient Concealment: Free Lunch for Defending Adversarial Attacks*. arXiv preprint arXiv:2205.10617.
24. Meng, D., & Chen, H. (2017, October). Magnet: a two-pronged defense against adversarial examples. In *Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC conference on computer and communications security* (pp. 135-147).
25. Moosavi-Dezfooli, S.M., Fawzi, A., & Frossard, P. (2016). Deepfool: a simple and accurate method to fool deep neural networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 2574-2582).
26. Lindqvist, B., & Izmailov, R. (2020). Minimax defense against gradient-based adversarial attacks. arXiv preprint arXiv:2002.01256.
27. Harder, P., Pfreundt, F. J., Keuper, M., & Keuper, J. (2021, July). Spectraldefense: Detecting adversarial attacks on cnns in the fourier domain. In *2021 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1-8). IEEE.
28. Kwon, H., & Lee, J. (2020). AdvGuard: fortifying deep neural networks against optimized adversarial example attack. IEEE Access.
29. Carlini, N., & Wagner, D. (2017, May). Towards evaluating the robustness of neural networks. In *2017 IEEE symposium on security and privacy (SP)* (pp. 39-57). IEEE.
30. Xu, W., Evans, D., & Qi, Y. (2017). Feature squeezing mitigates and detects carlini/wagner adversarial examples. arXiv preprint arXiv:1705.10686.
31. Samangouei, P., Kabkab, M., & Chellappa, R. (2018). Defense-gan: Protecting classifiers against adversarial attacks using generative models. arXiv preprint arXiv:1805.06605.
32. Papernot, N., & McDaniel, P. (2018). Deep k-nearest neighbors: Towards confident, interpretable and robust deep learning. arXiv preprint arXiv:1803.04765.
33. Alkhowaiter, M., Kholidy, H., Alyami, M. A., Alghamdi, A., & Zou, C. (2023). Adversarial-Aware Deep Learning System Based on a Secondary Classical Machine Learning Verification Approach. *Sensors*, 23(14), 6287.

Отримано 01.02.2024

Artem Volokyta¹, Mykyta Melenchukov²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Computer Engineering
National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: artem.volokita@kpi.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9069-5544>

²PhD student of Department of Computer Engineering
National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: melenchukov.nikita@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6615-4306>

**NEURAL NETWORKS IN DETECTING ATTACKS
ON DISTRIBUTED SYSTEMS**

Modern challenges in processing vast amounts of data are solved with the help of complex distributed systems, which in turn require cyber protection, that has the instruments for managing security risks such as information acquisition, espionage, reduction of system productivity, etc. This article provides an overview of some approaches to detecting cyberattacks, which in particular use machine learning. Their advantages, disadvantages, work methods, vulnerabilities, and approaches to their protection are given. Approaches to using various machine learning models for pre-processing input data, which is subsequently analyzed by intrusion detectors, and ways of improving the accuracy and effectiveness of cyberattack identification were also investigated.

As a result of the analysis of research, it is shown that there is a need to combine data from various attack detection systems used at different layers of cyber defense. The use of attack detection systems in different layers of the system allows the detection of such attacks as SQL insertion, obtaining administrator rights, acquiring access to the node, DDoS, and Probe. This can be done by analyzing logs, or network packets in case of SQL insertion, or by monitoring Internet traffic during a DDoS attack. Taking into account the growing variety of attacks on distributed systems and the increase in the amount of information being processed, the use of machine learning in attack detection systems is becoming an increasingly attractive direction for study. Artificial intelligence can be involved in selecting the necessary features for analysis, detecting interventions, reducing the level of false attack detections, and improving the accuracy of their recognition. The ability to retrain the model on new data is a significant advantage due to the small number of available test datasets dedicated to attacks on distributed systems. There is a need to investigate the feasibility of using certain machine learning models and neural networks, based on available input data and requirements for accuracy and speed.

It has been determined that anomaly detection is the most common approach to recognizing attacks using machine learning in the commercial product market. Analysis of attacks against machine learning-based defenses that use an anomaly detection approach has shown that there are weaknesses that can be minimized with additional protection; for example, time-distributed attacks can adapt to acceptable ranges of deviation of network indicators. An overview of the mechanisms for ensuring the resistance of protection systems to such influences, including the addition of various noises during training, range reduction of system parameter values, variations in retraining the model on misleading data, and the use of special classifiers, was performed.

Keywords: intrusion detection systems; neural networks; distributed systems; anomaly detection; machine learning.

Table: 5. **References:** 33.

Світлана Корнієнко¹, Ігор Корнієнко², Віра Мурашківська³

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: cornel@ukr.net, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9162-1229>

ResearcherID: AAV-4708-2020. **SCOPUS Author ID** 57219057983

²кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: cornelukr@gmail.com, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9105-0780>

ResearcherID: F-7236-2017. **SCOPUS Author ID** 57485157200

³старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого моделювання

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vmurashkovska@gmail.com, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0556-8709>, **ResearcherID:** [G-9757-2016](http://orcid.org/0000-0002-0556-8709)

**АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ РОЗРОБКИ ПРОГРАМ ВИПРОБУВАНЬ
ЗРАЗКІВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

У статті розглянуто проблему автоматизації і інформаційної підтримки процесу розробки програми випробування у складі автоматизованої інформаційної системи супроводження випробувань спеціальної техніки. Запропоновано підхід використання бази даних існуючих програм і методик, у яких відігруються збіги на основі класифікації випробуваного зразка та за одним із трьох варіантів формується прототип (шаблон) для розробки нової програми випробувань.

Формалізовано загальні принципи й особливості інформаційної підтримки розробника програми та обміну повідомленнями в робочій групі розробників документації на етапі узгодження та затвердження програми випробувань. Розроблено алгоритм вибору методу автоматизованої розробки програми випробування.

Ключові слова: автоматизація; випробування; інформаційна підтримка; програма; спеціальна техніка.

Рис.: 4. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Останні дев'ять років існування України пов'язане з неприхованою військовою агресією російської федерації і необхідністю боронити територію та державність України. Маючи розвинений військово-промисловий комплекс, Україна за цей період ініціювала та налагодила процес створення власних військових розробок на рівні кращих світових трендів. Важливим у процесі розробки нових і модернізації наявних зразків спеціальної техніки є етап їх випробувань. З огляду на велику кількість військових розробок і заявок на випробування, постає проблема організації сталого процесу якісних випробувань та максимізація пропускну здатності випробувальної організації. Останнє можливо за рахунок зменшення часових витрат на виконання робіт всіх етапів випробування, що забезпечується автоматизацією ручних трудомістких робіт, налагодження дієвої інформаційної взаємодії (у тому числі документообігу) між всіма учасниками процесу випробувань і інформаційної підтримки наукової і інженерно-випробувальної роботи.

Постановка проблеми. Процес випробувань зразків спеціальної техніки включає багато трудомістких етапів і операцій, які, хоч і не пов'язані безпосередньо з практичними випробуваннями, але вимагають володіння та оперування певними науковими підходами і методами, творчих і системних здібностей, чималих часових витрат і є обов'язковими у суцільному технологічному процесі випробувань. До одного з таких процесів відноситься розробка програми випробувань виробу. Незважаючи на широкий спектр зразків спеціальної техніки, які можуть надходити на випробування, структура програм випробування чітко регламентована керівними настановами й залишається незмінною, а часткова універсальність підходів, методів і методик випробування, поряд з усталеною структурою програми, створює підґрунтя до можливої автоматизації та інформаційної підтримки безпосередньо самого процесу розробки програми випробувань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання автоматизації процесу випробувань технічних зразків самого різного виду присвячено чимало наукових робіт і публікацій. Серед них слід зазначити роботи: [1; 2], у яких розглядаються концептуальні системні підходи до єдності проведення випробувань; у [3; 4] досліджуються проблеми інформаційної підтримки та забезпечення випробувань; у [5-7] розглядаються питання планування й управління процесом випробувань озброєння та військової техніки. Питанням створення автома-

тизованої інформаційної системи супроводження випробувань озброєння та військової техніки авторами приділено чимало уваги й опублікований цикл наукових робіт, так, зокрема, у [8] наведено склад функціональних компонент інформаційної системи, а у [9] розглянуто інформаційну взаємодію модуля автоматизованого складання програми випробувань.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на розроблені загальні підходи до автоматизації процесу випробувань, і, зокрема, автоматизації підготовчого етапу випробувань залишається не розробленим алгоритмічний апарат, який дозволить створити модуль автоматизованої розробки програми випробувань зразків спеціальної техніки у складі інформаційної системи супроводження випробувань.

Мета дослідження. На основі сформованих концептуальних підходів до створення інформаційної системи супроводження випробувань, запропонованого складу інформаційних компонент та нормативних документів з правил та порядку розробки програми випробувань, розробити алгоритмічний апарат модуля автоматизованої розробки програми випробувань зразків спеціальної техніки.

Виклад основного матеріалу. Основними призначеннями інформаційної системи супроводження випробувань є всебічна інформаційна підтримка процесів на всіх стадіях випробувань, автоматизація ручних трудовитратних робіт, налагодження інформаційної взаємодії між всіма суб'єктами випробувань та підтримка прийняття управлінських рішень [8]. Процес розробки програми випробувань, з одного боку, справедливо віднести до трудовитратних робіт, а з іншого – це, безумовно, творча робота, що вимагає системного мислення та чималих знань у сфері наукових підходів та інженерних методик випробувань. І якщо перше передбачає використання засобів автоматизації та прийомів алгоритмічної підтримки автоматизованого складання документів, то друге – обумовлює потребу максимальної інформаційної підтримки творчої діяльності в частині надання всієї необхідної науково-технічної та нормативно-довідкової інформації у зручному, структурованому вигляді, причому доступ до такої інформації має відбуватись за мінімальний час.

Функціональний аналіз процесу складання програми випробувань у системі випробувань був виконаний на загальному рівні за допомогою діаграмної техніки IDEF0 (місце процесу розробки програми випробувань та деталізація процесу розробки відображено на діаграмах рис. 1, рис. 2).

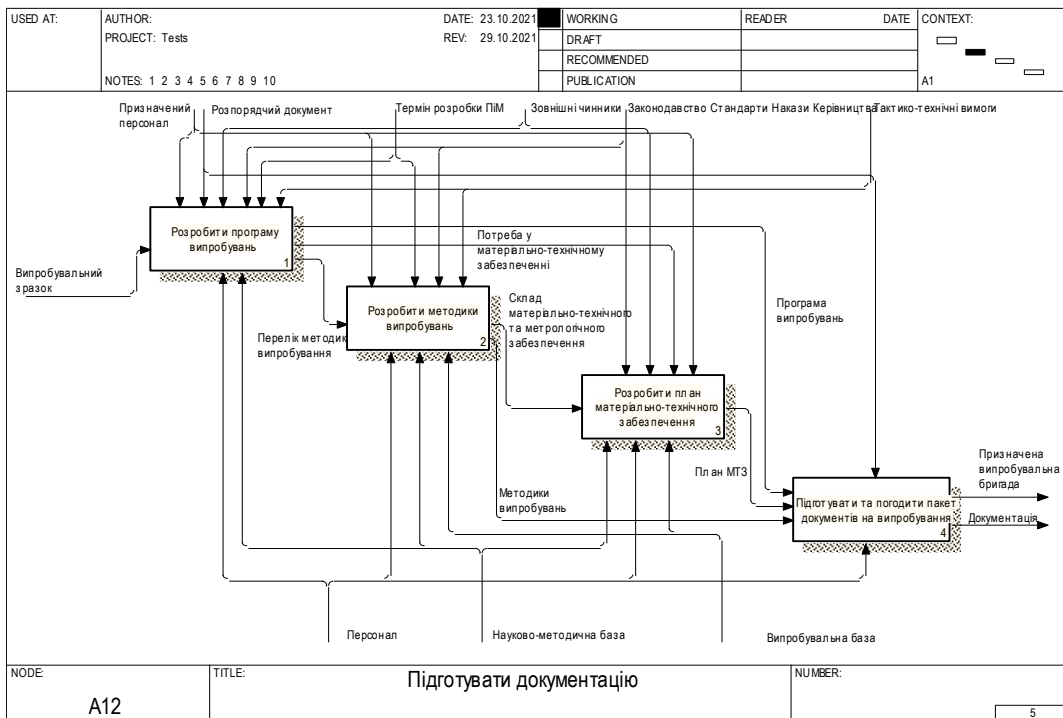


Рис. 1. Деталізуюча діаграма процесу підготовки науково-методичної документації до випробувань зразка

Зауважимо, що деталізуюча діаграма на рис. 2 характеризує перший рівень ієрархії функціональної декомпозиції процесу розробки програми випробувань і не дозволяє перейти безпосередньо до алгоритмізації інформаційної підтримки процесу розробки програми випробувань, проте дає основне уявлення щодо потреби в інформаційних ресурсах.

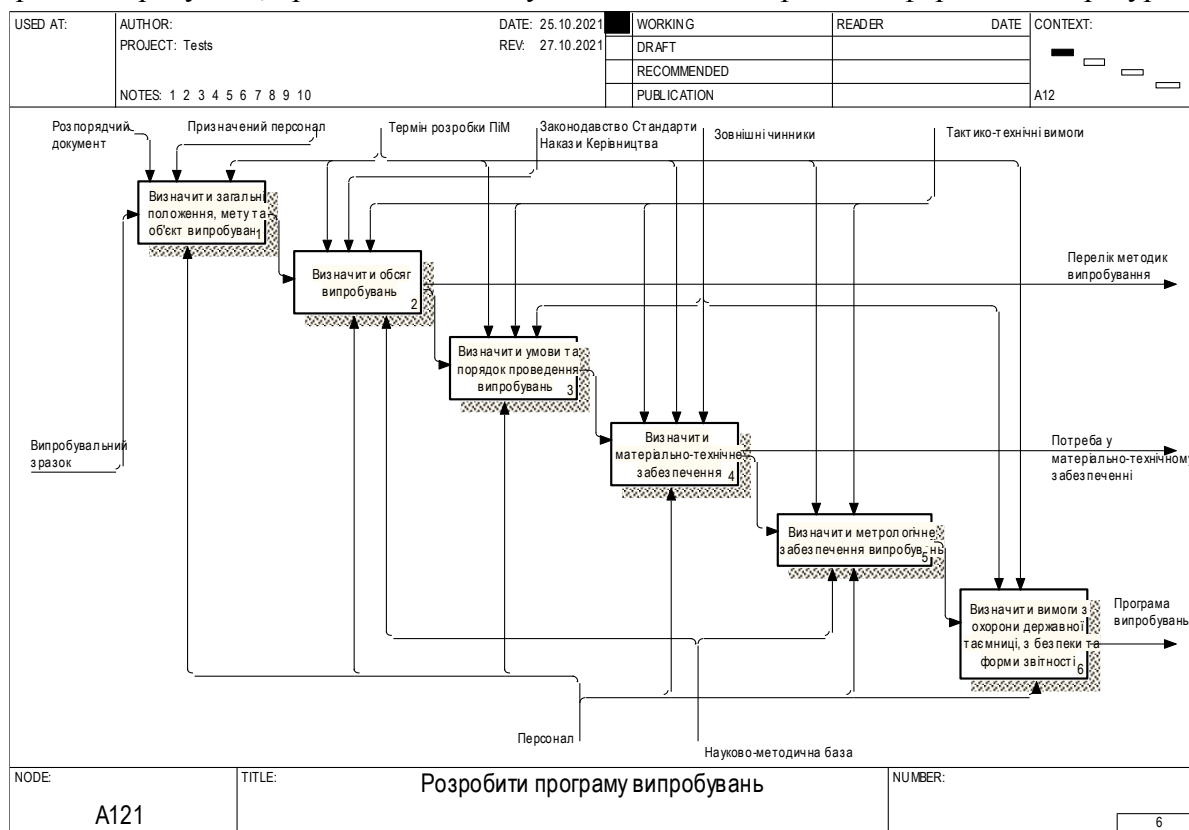


Рис. 2. Деталізуюча діаграма процесу розробки програми випробувань зразка

Для деталізації і формалізації робіт і процесів, що потребують алгоритмування, розглянемо детально типову структуру програми випробувань. Відповідно до чинного, на цей момент, в Україні стандарту [10], типова структура програми випробувань містить наступні розділи: об'єкт випробувань; мета випробувань; загальні положення; обсяг випробувань; умови та порядок проведення випробувань; матеріально-технічне забезпечення випробувань; метрологічне забезпечення випробувань; вимоги з охорони державної таємниці; вимоги безпеки; звітність. Завдання з інформаційної підтримки процесу розробки програми полягає в забезпеченні необхідною структурованою інформацією всі розділи програми, налагодженні й використанні системи лінгвістичної підтримки при автоматизованому формуванні документа, запровадженні системи електронного документообігу та обміну інформацією. Розкриємо більш докладно сутність та наявні інструменти інформаційної підтримки:

– *пошук і подання структурованої інформації* для формування програми забезпечується нормативно-довідковою базою даних (що містить у собі [9] класифікатор спеціальної техніки, базу даних спеціальної техніки, базу даних тактико-технічних вимог, базу даних існуючих програм, методик та планів випробування) та технологічною базою даних (що містить в собі [8] структуровану інформацію щодо методології, підходів, методів, методик, стандартів, норм у випробувальній діяльності, базу даних наявного метрологічного обладнання та відомостей щодо полігонно-випробувальної бази з відповідним геоінформаційним забезпеченням, та бази даних аналітичних та імітаційних моделей для проведення віртуальних випробувань у випадку коли інше неможливе);

– *логістична підтримка* інформаційної системи супроводження випробувань і зокрема модуля розробки програми випробувань повинна забезпечувати системну єдність для всіх автоматизованих робочих місць (АРМ): єдину мову спілкування користувачів з системою, єдині методи формалізації текстових документів, нормалізації і редагування даних, єдиний термінологічний словник, що має однакове смислове навантаження. Для автоматизованого формування програми, як текстового документа, повинні застосовуватись вже добре відомі стандартні методи лінгвістичної підтримки, як то використання шаблонів та екранних форм, спливаючих підказок, стандартних фраз (уніфікованих для всіх видів виробів), відображення динамічних полів, використання заздалегідь визначених змінних у шаблоні документа тощо;

– *система електронного документообігу* забезпечує інформаційну взаємодію між всіма учасниками процесу випробувань від моменту ініціалізації розробки програми, узгодженню між всіма учасниками випробувань, відправки на затвердження до вищого органу і, в подальшому, відправки кінцевому користувачу. Фахівці, що беруть участь у підготовчому етапі випробувань з інших випробувальних підрозділів, матимуть змогу бачити процес підготовки програми випробувань, отримувати сповіщення про необхідність відпрацювання окремих параграфів або пунктів, бачити статус документа, вносити пропозиції з корегування. На завершальному етапі підготовки документ надсилається на погодження та затвердження, причому зберігається та поширюється тільки остання, затверджена версія документа. Сама система документообігу виконує функції введення документа в систему, його реєстрацію, розподіл, розсилку, оперативне зберігання, контроль виконання, розмежування доступу, використання електронного підпису тощо.

На основі вимог [10] та рекомендацій [11] сформуємо структурно-функціональну схему процесу автоматизованої розробки програми випробувань (рис. 3), при цьому використаємо функціональний склад інформаційної системи супроводження випробувань, що наданий у [9].

Розглянемо докладно етапи автоматизованого процесу розробки програми випробувань. Після надходження заявки на випробування, у модулі автоматизованого формування команди на підготовчий етап випробувань, здійснюється аналіз заявки (пакету вхідних документів) та формування команди випробувачів, яка після видання відповідного наказу, ініціює розробку програми випробування (на схемі рис. 3, курсивним шрифтом у затемнених прямокутниках відображені дії підсистеми документообігу, як то реєстрація, наказ тощо). На початковому етапі відбувається уточнення тактико-технічних вимог (ТТВ), мета якого сформувати повний список вимог, параметрів і характеристик, яким має відповідати випробуваний зразок. Такий список формується на основі опрацювання вхідних даних тактико-технічного завдання (ТТЗ), технічної документації, ТТВ до даного виду зразків спеціальної техніки, відомостей, щодо сучасних і перспективних розробок провідних країн світу, і як наслідок, у випадку додавання нових складових випробувань, а також, аналізу бази даних програм випробування зразків, обирається один з можливих методів розробки програми випробувань: розробка програми з "нуля", використання існуючої програми, модифікація існуючої програми. Різниця між цими методами полягає у формах подання шаблону для формування нової програми та загальному алгоритмі взаємодії допоміжних модулів. Так, "Розробка програми з "нуля" передбачає використання шаблону програми, що складається зі структури документа, мінімальної кількості заздалегідь підготовлених змінних і стандартних фраз. "Використання існуючої програми" – навпаки, надає шаблон, в якому вже відображені фактично всі відомості, знайденої в архіві програми випробувань аналога зразка, який за типом максимально наближений до випробуваного зразка, при цьому, заміні у прототипі програми підлягають лише визначальні складові програми, як то: назва зразка, найменування розробника, підстава для ви-

пробування, технічні вимоги та відповідні показники тощо. "Модифікація існуючої програми" передбачає можливість певної модифікації прототипу програми, як то: додавання нових параграфів, пунктів, підпунктів у будь-який розділ, заміна та модифікація будь-якого контенту програми-прототипу.

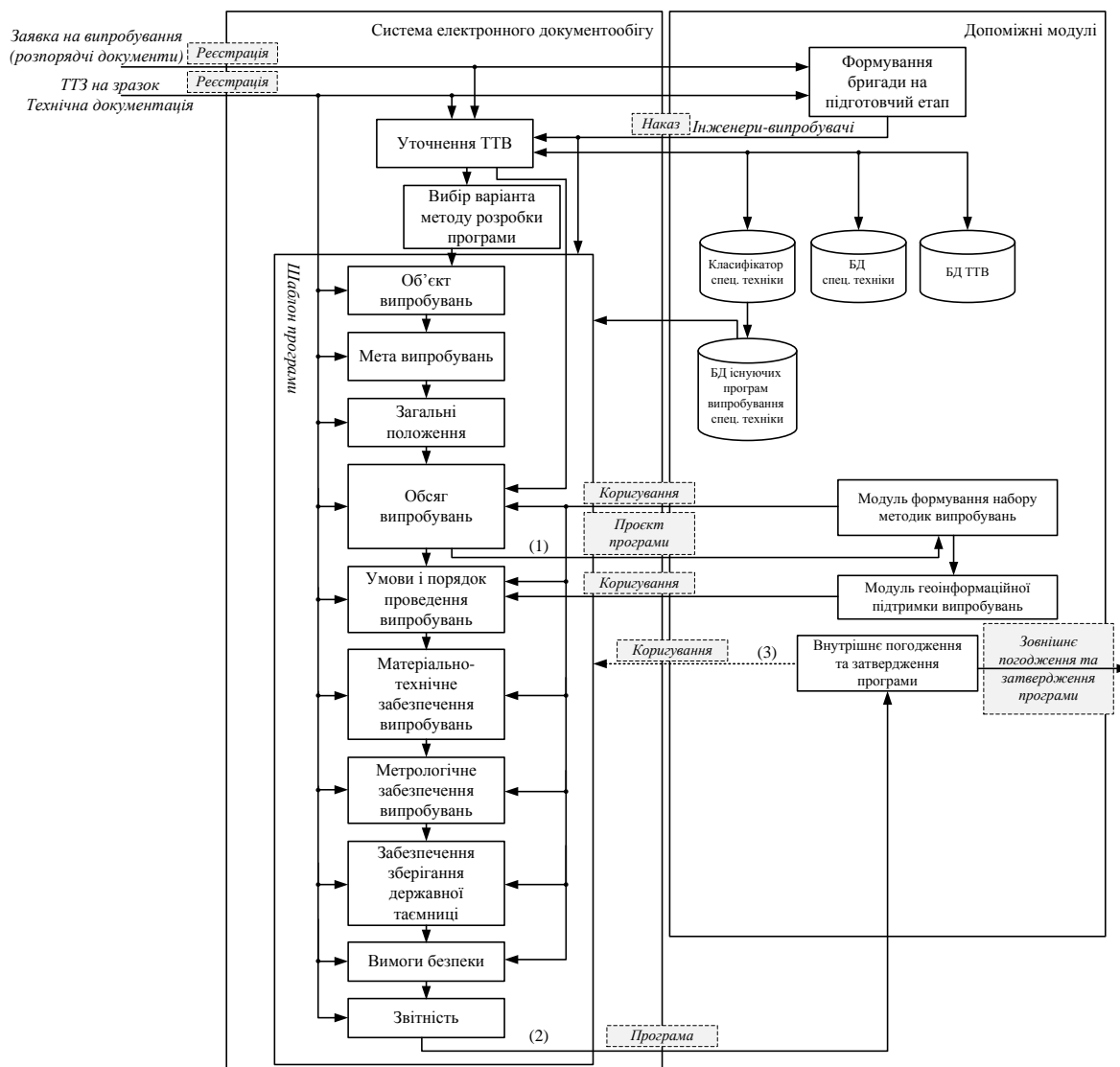


Рис. 3. Структурно-функціональна схема процесу автоматизованої розробки програми випробувань

Для деталізації процедури вибору методу автоматизованої розробки програми представимо її у вигляді алгоритму (рис. 4).

Алгоритм, що представлений на рисунку 4 не передбачає ручного вибору шаблону для розробки програми випробувань, проте таку функцію, за потреби, можна включити як альтернативу автоматичному вибору методу розробки програми. Корисним, на даному етапі, є введення змінних для автоматичної розстановки в подальшому тексті програми випробувань, як то: назва зразка, розробник, метадані розпорядчих документів тощо. Для автоматизованого введення даних доцільно використати форми у вигляді спадних списків, зокрема: клас зразка спеціальної техніки, група характеристик або конкретна характеристика у групі тощо. Така функція є корисною, якщо відсутній електронний документ ТТЗ у вигляді обмінного файлу, інакше – вся процедура введення даних є автоматичною. Зауважимо, що такі дані можна було б автоматично розміщувати у БД зразків спеціальної техніки з поміткою про випробувальний зразок.

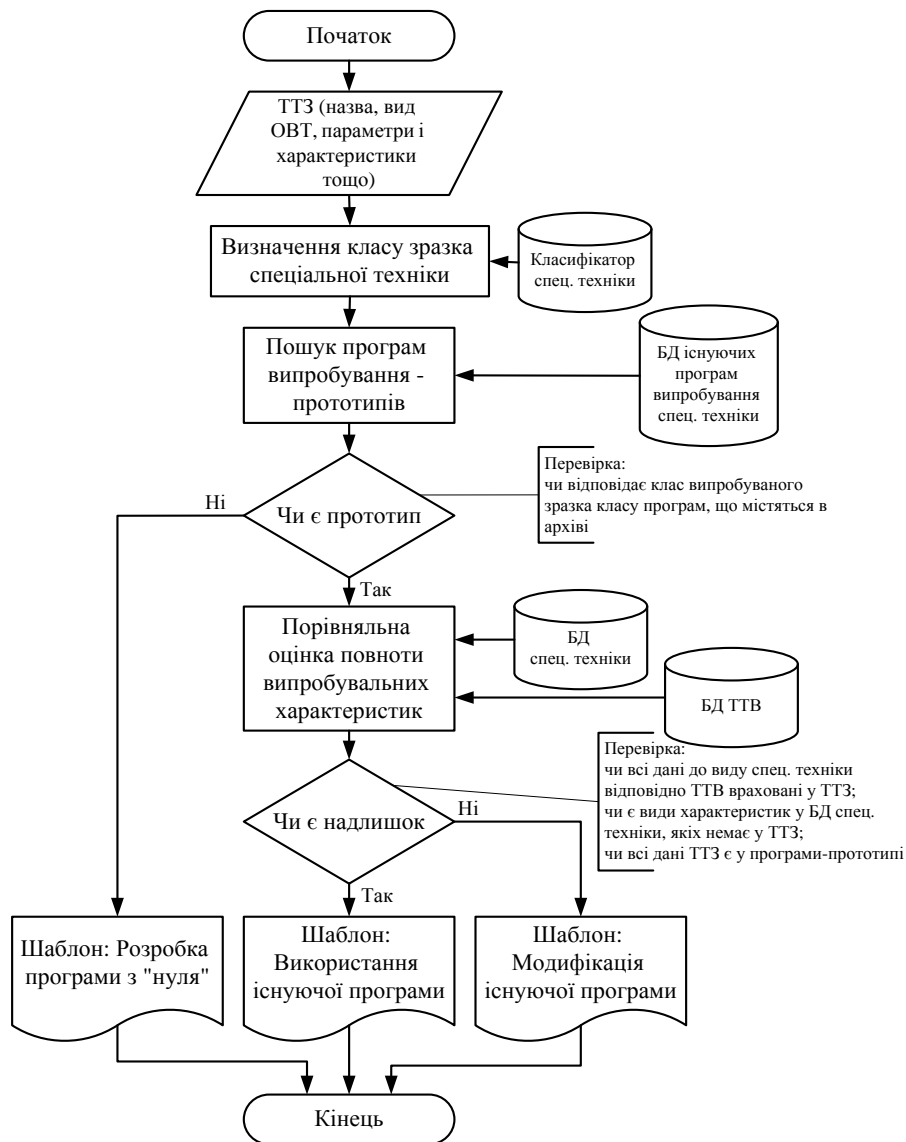


Рис. 4. Алгоритм вибору методу автоматизованої розробки програми випробування

Після вибору шаблону, розробнику програми, по черзі, надаються відповідні розділи (об'єкт випробувань, мета випробувань, загальні положення) з полями для заповнення, обсяг яких визначається видом шаблону. Розділ «Обсяг випробувань» визначається відповідно до шаблону зі вставками груп параметрів і характеристик ТТЗ, які потребують випробування, а також, за потреби, доданими параметрами і характеристиками, відшуканими на основі аналізу ТТВ та БД спеціальної техніки. Сформовані розділи складають проект програми, який розсилається інженерам-випробувачам інших підрозділів для складання методик випробування (на схемі рис. 3 розсилка показана зв'язком (1)). Розроблені методики надходять для узагальнення і можливого коригування у блок "Обсяг випробування". За потреби, розробники методик можуть використовувати модуль геоінформаційної підтримки, в якому задаються просторові та ландшафтні вимоги до полігонної бази і які, в подальшому, надходять у блок «Умови та порядок проведення випробувань».

Зауважимо, що на наш погляд, виконувати обмін документами (програма випробувань, проект програми випробувань, методики випробувань) доцільно здійснювати у формі певного обмінного файлу (наприклад у форматі XML), що суттєво спростить розбір документа на складові частини у комп'ютерно-сприйнятій формі та подальшу агрегацію різних документів (наприклад методик випробування) у єдиний документ (наприклад програму). При

цьому, бажано використовувати технологію заздалегідь підготовлених змінних, що вставляються у поля документа. Такими змінними можуть бути, наприклад, вимірювальні прилади або інше метрологічне обладнання, полігонно-вимірювальні бази, інженери-випробувачі тощо. Використання такої технології, по-перше, зменшить імовірність допущення помилок у тексті документа, і, по-друге, створить передумови для впровадження системи підтримки робочого процесу, де, запланований на певний часу елемент програми випробувань (інженер-випробувач, вимірювальний прилад, або будь-що інше) забезпечить його недоступність для інших функцій (робіт, відряджень тощо), тим самим відбувається уникнення фактору подвійного планування на один й той же момент часу.

За умови використання обмінних файлів при формуванні методик випробування, решта процедур формування програми випробувань (зокрема розділів "Умови і порядок проведення випробувань", "Матеріально-технічне забезпечення випробувань", "Метрологічне забезпечення випробувань", "Вимоги з охорони державної таємниці", "Вимоги безпеки") виконуватимуться, майже, в автоматичному режимі під контролем оператора-розробника програми.

Після формування програми випробування у вигляді документа, відбувається розсилка на погодження і затвердження документа всередині випробувальної організації. У разі потреби – надсилаються зауваження про коригування програми випробування.

Висновок. У статті розглянуто підхід до автоматизованої розробки програми випробування. Автоматизація процесу розробки програми випробувань має сенс у випадку масового інтенсивного проведення випробувань широкого спектра зразків техніки спеціального призначення при обмеженнях ресурсів (людських, часових тощо) на проведення випробувальної діяльності. Запропонований механізм автоматизації представлено у вигляді структурно-функціональної схеми та алгоритму. Основою для визначення варіанту формування програми випробувань є база даних існуючих програм і методик випробування, в якій, на основі класифікації випробуваного зразка, відшукуються та аналізуються програми випробувань прототипів (аналогів).

Кінцева реалізація запропонованого підходу у складі автоматизованої системи супроводження випробувань забезпечить інформаційну підтримку дій розробника програми випробування, що сприятиме скороченню витрат часу на підготовчому етапі випробувань, налагодженню взаємодії команди розробників методик випробування та підвищенню ефективності системи документообігу випробувальної організації.

Список використаних джерел

1. Кошева, Л. А. Обеспечение единства испытаний. Концептуальные основы : монография / Л. А. Кошева. – Киев : НАУ. 2009. – 176 с.
2. Кошева, Л. О. Концептуальные основы обеспечения единости лабораторных испытаний [Электронный ресурс] : автореф. дис. ... д-ра. тех. наук / Национальный университет «Львівська політехніка» ; Л. О. Кошева. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2010. – 40 с. – Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua/bitstreams/ddf41850-9525-4482-8e04-3a6527587535/download>.
3. Шитікова, О. С. Інформаційна технологія підтримки процесу випробувань газотурбінних установок наземного використання з урахуванням невизначеності : дис. ... канд. тех. наук / О. С. Шитікова, ХНТУ. – Херсон : ХНТУ, 2017. – 24 с.
4. Марченко, И. П. Особенности информационного обеспечения автоматизированной системы сопровождения проведения квалификационных испытаний бортовой аппаратуры ракетно-космической техники [Электронный ресурс] / И. П. Марченко, А. А. Андрашов, Т. Ю. Педе // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 6 (47). – С. 279-283. – Режим доступу: http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&Z21ID=&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/recs_2010_6_49.
5. Питання воєнно-наукового супроводу створення інформаційних систем військового призначення / С. В. Бобров, О. С. Левшенко, Т. О. Ворона, О. В. Полякова, Г. В. Руденська, Т. М. Комаласва // Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського. – 2016. – № 2 (57). – С. 61-66. DOI: doi.org/10.33099/2304-2745/2016-2-57/61-66.

6. Корочкін, О. А. Управління процесом випробувань військової та спеціальної техніки / О. А. Корочкін, Т. В. Паращенко // Актуальні питання матеріально-технічного забезпечення військових формувань та правоохоронних органів : зб. тез доп. наук.-практ. конф. (м. Харків. 26 жовт. 2017 р.). – Харків, 2017. – С. 78-79.
7. Планування випробувань на надійність військової техніки / О. О. Акимов, О. Л. Бурсала, В. Т. Бояров, М. М. Жданюк // Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах : зб. тез доп. XVIII наук.-тех. конф., (м. Чернігів, 06-07 вересня 2018 р.). – Чернігів : ДНДІ ВС ОВТ, 2018. – С. 33-34.
8. Щодо можливих функціональних компонент інформаційної системи супроводження випробувань Збройних сил України / І. Корнієнко, С. Корнієнко, Д. Камак, С. Казначей, О. Жирна / Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2020. – № 6. – С. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.6.2020.06>.
9. Обґрунтування інформаційних компонентів нормативно-довідкової бази даних автоматизованої інформаційної системи супроводження випробувань озброєння та військової техніки / С. Корнієнко, І. Корнієнко, С. Казначей, О. Жирна, В. Кравченко // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2021. – № 7 (1). – С. 29-39. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.7.2021.04>.
10. Про затвердження Порядку проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України № 159 від 17.02.2021. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text>.
11. Методичні рекомендації щодо організації наукової і науково-технічної діяльності у Збройних Силах України. Ч.4. Основи організації випробувань зразків (комплексів, систем) озброєння і військової техніки для потреб Збройних Сил України. – Київ : ВНУ ГШ ЗС України, 2020. – 63 с.

References

1. Koshevaia, L.A. (2009). *Obespechenie edinstva ispytaniy. Kontseptualnye osnovy [Ensuring the unity of testing. Conceptual bases]*. NAU.
2. Kosheva, L.O. (2010). *Kontseptualni osnovy zabezpechennia yednosti laboratornykh vyprobuvan [Conceptual foundations of ensuring the unity of laboratory tests]* (Extended abstract of doctor's thesis, Lviv Polytechnic National University). <https://ena.lpnu.ua/bitstreams/ddf41850-9525-4482-8e04-3a6527587535/download>.
3. Shytikova, O.S. (2017). *Informatsiina tekhnolohiia pidtrymky protsesu vyprobuvan hazotur-binykh ustanovok nazemnoho vykorystannia z urakhuvanniam nevyznachenosti [Information technology to support the process of vip-testing of gas-turbine installations of a ground-based victorious plant for reasons of non-importance]* [Candidate's thesis, Kherson National Technical University].
4. Marchenko, Y.P. Andrashov, A.A., Pede, T.Iu. (2010). Osobennosti ynformatsyonnoho obespechennia avtomatyzyrovannoi systemy soprovozhdeniia provedeniia kvalyfykatsyonnykh uspytanyi bortovoi apparatury raketno-kosmycheskoi tekhniky [The features of information support for automated systems for aerospace equipment qualification testing]. *Radioelektronni i kompiuterni systemy – Radioelectronic and computer system*, 6(47), 279-283.
5. Bobrov, S.V., Levshenko, O.S., Vorona, T.O., Poliakova, O.V., Rudenska, H.V., Komolaieva, T.M. (2016). Pytannia voienno-naukovoho suprodu stvorennia informatsiinykh system viiskovo-ho pryznachennia [Issues of military-scientific support of creation of information systems for military purposes]. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Na-tSIONalnoho univertsytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho – Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defense University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky*, 2(57), 61-66. doi.org/10.33099/2304-2745/2016-2-57/61-66.
6. Korochkin, O.A., Parashchenko, T.V. (2017). Upravlinnia protsesom vyprobuvan viiskovoi ta spetsialnoi tekhniky [Management of the process of testing military and special equipment]. *Aktualni pytannia materialno-tekhnichnoho zabezpechennia viiskovykh formuvan ta pravookhoronnykh orhaniv – Actual issues of material and technical support of military formations and law enforcement agencies: proceedings of scientific and practical conference* (pp. 78-79).
7. Akymov, O.O., Bursala, O.L., Boiarov, V.T., & Zhaniuk, M.M. (2018). Planuvannia vyprobuvan na nadiinist viiskovoi tekhniky [Planning reliability tests of military equipment]. *Stvorennia ta modernizatsiia ozbroiennia i viiskovoi tekhniky v suchasnykh umovakh – Creation and modernization of weapons and military equipment in modern conditions: Proceedings of the XVIII Scientific and Technical Conference* (pp. 33-34).

8. Korniienko, I., Korniienko, S., Kamak, D., Kaznachei, S., Zhyrna, O. (2020). Shchodo mozhlivykh funktsionalnykh komponent informatsiinoi systemy suprovodzhennia vyprobuvan Zbroinykh syl Ukrainy [Regarding the possible functional components of the information system for supporting tests of the Armed Forces of Ukraine]. *Naukovi pratsi Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfika-tsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki – Scientific works of the State Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment*, (6), 52-61. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.07>.

9. Korniienko, S., Korniienko, I., Kaznachei, S., Zhyrna, O., Kravchenko, V. (2021). Obgruntuvannia informatsiinykh komponentiv normatyvno-dovidkovoi bazy danykh av-tomatyrovanoi informatsiinoi systemy suprovodzhennia vyprobuvan ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki [Justification of the information components of the normative reference database of the automated information system for supporting tests of weapons and military equipment]. *Zbirnyk nauko-vykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki – Scientific works of the State Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment*, 7, 29-39. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.7.2021.04>.

10. Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia vyprobuvan zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki [On approval of the Procedure for conducting tests of samples of weapons and military equipment], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 159. (2021). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text>.

11. Metodichni rekomendatsii shchodo orhanizatsii naukovo i nauko-tekhnichnoi diialnosti u Zbroinykh Sylakh Ukrainy. Ch.4. Osnovy orhanizatsii vyprobuvan zrazkiv (kompleksiv, system) ozbroiennia i viiskovoi tekhniki dlia potreb Zbroinykh Syl Ukrainy [Methodological recommendations regarding the organization of scientific and scientific and technical activities in the Armed Forces of Ukraine. Part 4. Basics of organizing tests of samples (complexes, systems) of weapons and military equipment for the needs of the Armed Forces of Ukraine]. (2020). VNU GSH of the Armed Forces of Ukraine.

Отримано 13.02.2024

UDC 519.872.4

Svitlana Korniienko¹, Ihor Korniienko², Vira Murashkovska³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Mathematical Modeling
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: cornel@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9162-1229>

ResearcherID: [AAV-4708-2020](https://orcid.org/AAV-4708-2020). **SCOPUS Author ID:** [57219057983](https://orcid.org/57219057983)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Geodesy, Cartography And Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: cornel@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9105-0780>

ResearcherID: [F-7236-2017](https://orcid.org/F-7236-2017). **SCOPUS Author ID:** [57219054966](https://orcid.org/57219054966)

³Senior Lecturer of the Department of AT and SMB

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vmurashkovska@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0556-8709>. **ResearcherID:** [G-9757-2016](https://orcid.org/G-9757-2016)

ALGORITHM FOR AUTOMATED DEVELOPMENT OF PROGRAMS FOR TESTING SAMPLES OF SPECIAL EQUIPMENT

The speed and timeliness of the process of rearming the Armed Forces of Ukraine with the latest or modernized high-tech samples of special equipment are affected, among other things, by the processes associated with the tests of experimental samples of special equipment at various stages of their creation. Under the condition of carrying out mass tests of heterogeneous technical products of a rather wide range, the question arises of maximum automation of all processes in the chain of works at various stages of testing, in particular, the development of regulatory and technical documentation.

The automated development of programs for testing samples of special equipment allows to reduce the labor and time costs of the preparatory stages of tests, and, accordingly, the total duration of tests, which will increase the throughput of the testing facility during mass tests.

The analysis of research and publications on test automation issues showed insufficient attention in the scientific literature to the theoretical justification and practical implementation of automated test process support systems, and, especially, to issues of automating the organizational component of the test process.

The purpose of the article is to develop an approach to the automated compilation of a test program for a wide range of samples of special equipment.

The article proposes an approach of using a database of existing programs and methods, in which matches are sought based on the classification of the tested sample and, according to one of three options, a prototype (template) is formed for the development of a new test program. Formalized general principles and features of information support for the program developer and exchange of messages in the working group of documentation developers at the stage of agreement and approval of the test program. An algorithm for choosing a method of automated test program development has been developed.

The proposed approach of information support for the process of developing a test program is consistent with the general concept of creating an automated information system for supporting tests of special equipment samples. It can be expected that the automation of the subsystem for the preparation of regulatory and technical documentation of tests will ensure a reduction of time and human resources, simplify the interaction within the working group of developers of the program and test methods, and increase the efficiency of the document flow system of the testing organization.

Keywords: automation; testing; information support; program; special equipment.

Fig.: 4. References: 11.

Артем Сигута¹, Олексій Красножон²

¹аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, група АСД-122-22
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: syguta@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8328-1277>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>. ResearcherID: [G-4623-2014](https://orcid.org/0000-0003-2500-254X)

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОШУКУ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ

Запропонована стаття є оглядовою, її присвячено дослідженню існуючих методів пошуку вибухонебезпечних предметів, зокрема, таких, як: георадар, Раманівська спектроскопія та пошук за допомогою терагерцового (THz) сигналу. Георадар - це технологія, яка використовує радіохвилі для виявлення підземних об'єктів. У контексті пошуку вибухонебезпечних предметів, георадар може виявити закопану вибухівку або об'єкти, які можуть бути використані як сховища для неї. Раманівська спектроскопія – це метод аналізу хімічного складу речовини шляхом вимірювання параметрів розсіяного світла на молекулах цієї речовини. Цей метод може використовуватися для виявлення вибухонебезпечної речовини, наприклад, нітрогліцерину, що є основним компонентом багатьох видів вибухівки. Пошук за допомогою THz-сигналу використовує електромагнітні хвилі, частота яких складає одиниці ТГц, для виявлення підозрілих об'єктів. THz-сигнали можуть проникати крізь велику кількість речовин, включаючи текстиль, пластмасу та ін., які можуть бути використані для маскуванню вибухових предметів. Використання георадара, Раманівської спектроскопії та пошуку за допомогою THz-сигналу можуть значно поліпшити можливості пошуку вибухонебезпечних предметів та забезпечити безпеку в громадських місцях та на транспорті.

Ключові слова: міни; вибухонебезпечні предмети; методи пошуку; георадар; Раманівська спектроскопія; терагерцова технологія.

Рис.: 11. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Головною загрозою для цивільного населення після закінчення бойових дій на певній території є наявність вибухонебезпечних предметів, крім того, це є нагальною проблемою безпеки особового складу і під час ведення таких дій. Будь-який конфлікт характеризується застосуванням наземних мін всіма сторонами, і з кожним роком ця тенденція лише посилюється.

Зростання обсягів застосування наземних мін обумовлено такими чинниками [1]:

- високою ефективністю, тобто здатністю виводити з ладу важке озброєння і транспортні засоби, вражати особовий склад та наносити йому важкі поранення;
- простотою конструкції, що забезпечує їх використання персоналом, який має низьку кваліфікацію, або для підготовки якого не потрібно багато часу;
- низькою собівартістю виготовлення.

Загальна картина постійно погіршується небезпекою підризу цивільного населення на боєприпасах, що не розірвалися, і прихованих мінах, яких стає дедалі більше в районах завдання ударів артилерії і авіації. За оцінками спеціалістів Міжнародного Комітету Червоного Хреста у всьому світі на мінах щомісячно підривається близько 800 людей, більшу частину з яких складають цивільні. Особливого занепокоєння викликає факт не відповідності темпів розмінування темпам встановлення: щорічно замість кожних 100 тисяч виявлених та знешкоджених мін встановлюється від 2 до 5 мільйонів нових [1].

Таким чином, проблема пошуку і своєчасного виявлення вибухонебезпечних предметів є дуже важливою і актуальною в контексті війни, що триває зараз, для галузі інформаційних технологій, оскільки вимагає обробки значних обсягів даних.

Постановка проблеми. Як зазначалося вище, належний пошук мін – це найголовніша задача гуманітарного розмінування будь-якої місцевості. Як правило, міни і вибухові пристрої встановлюються із застосуванням різних заходів із маскуванню, причому маскуванню відбувається із використанням різних матеріалів, рідин тощо, які не відносяться до вибухонебезпечних.

Виділяють контактні і безконтактні (дистанційні) методи виявлення вибухонебезпечних предметів. При контактному виявленні необхідна присутність сапера безпосередньо поряд із вибуховим пристроєм, який за допомогою спеціального щупа визначає ступінь порушення цілісності поверхні ґрунту.

Безконтактні методи виявлення є більш безпечними, але вимагають наявності джерел генерації і приймачів сигналів, відбиття яких від об'єктів і обробка пристроями пошуку і підтверджує наявність або відсутність вибухових предметів. Основною проблемою безконтактного виявлення є розпізнавання та виділення корисного (відбитого) сигналу на фоні численних завад і перешкод, спричинених неоднорідністю довкілля, впливом інших джерел випромінювання тощо.

Таким чином, актуальною є проблема дослідження існуючих методів дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів, зокрема, протипіхотних мін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що методи терагерцової технології, георадара та Лазерної Раманівської спектроскопії є ефективними та перспективними у виявленні вибухонебезпечних речовин. Вони характеризуються високою чутливістю, специфічністю та здатністю працювати у реальному часі. Подальші дослідження і розвиток цих методів можуть сприяти покращенню систем безпеки та забезпеченню захисту від потенційних небезпек.

Метод терагерцової технології використовує електромагнітне випромінювання у терагерцовому діапазоні (між мікрохвильовим та інфрачервоним), що дозволяє виявляти та ідентифікувати вибухонебезпечні речовини. Недавні дослідження показують, що терагерцова технологія демонструє високу чутливість до хімічних змін у матеріалах, а також може виявляти навіть дуже низькі концентрації речовин. Застосування терагерцового випромінювання в поєднанні з алгоритмами обробки даних та штучного інтелекту сприяє розробці ефективних систем виявлення вибухонебезпечних матеріалів.

Георадар – це ще один метод, який знаходить застосування в пошуку вибухонебезпечних речовин. Георадар використовує радіохвильове випромінювання для вимірювання властивостей ґрунту або інших матеріалів. Останні дослідження показують, що георадар може виявляти зміни в діелектричних властивостях матеріалів, викликані присутністю вибухонебезпечних речовин. Завдяки високій роздільній та проникаючій здатностям, він може бути ефективним у виявленні вибухонебезпечних матеріалів, які можуть бути прихованими або замаскованими.

Лазерна Раманівська спектроскопія є ще одним перспективним методом виявлення вибухонебезпечних речовин. Вона базується на аналізі розсіяного світла після освітлення лазерним променем. Кожна речовина має свої характеристичні спектри розсіювання, які і можна використовувати для їх ідентифікації. Останні дослідження показують, що Лазерна Раманівська спектроскопія має високу специфічність та чутливість до хімічного складу матеріалів, включаючи вибухонебезпечні речовини. Вона може бути застосована для неінвазивного та швидкого виявлення таких речовин навіть у великих обсягах.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Невирішеним завданням є визначення оптимального (з погляду ефективності і вартості обладнання) методу пошуку вибухонебезпечних предметів в сучасних умовах війни, оскільки на ряду зі старими класичним з'явилися і нові, більш досконалі методи. Тому, необхідно провести дослідження існуючих методів пошуку вибухонебезпечних предметів та проаналізувати можливості їх застосування в сучасних умовах.

Мета статті. Метою даної статті є дослідження деяких існуючих методів пошуку вибухонебезпечних предметів як на ділянках ведення бойових дій, так і на цивільних територіях під час гуманітарного розмінування, а також аналіз ефективності їх застосування та визначення напрямів розвитку автоматизованих інструментів пошуку з метою подальшого спрощення процесу знешкодження та очищення територій, зокрема, від протипіхотних мін.

Виклад основного матеріалу. Залежно від цільового призначення всі міни розподіляють на [2]:

- протитанкові (здатні вражати будь-які транспортні засоби);
- протипіхотні (здатні вражати людей, тварин і легку техніку);
- об’єктні (здатні вражати конкретні об’єкти або будівлі);
- спеціалізованого призначення.

Найбільшу складність в процесі розмінування викликає пошук саме протипіхотних мін, що спричинено рядом факторів:

- взимку, коли шар ґрунту промерзає, деякі міни можуть детонувати від надлишкового тиску, тоді як інші можуть не вибухнути навіть якщо їх активують шляхом натискання (такі випадки називаються самодеактивацією);
- навесні, коли відбувається танення снігового покриву або йдуть рясні дощі, ґрунт стає напіврідким, і деякі міни можуть “мігрувати” (переміщуватися на відстань до кількох метрів від місця встановлення).

Своєю чергою, демаскуючі ознаки встановлення мін обумовленні низкою факторів, серед основних (фактори, що присутні майже завжди) можна виділити наступні [2]:

- наявність вибухової речовини та локально розміщеної маси металу (навіть т. зв. “неметалеві” – міни в пластикових корпусах – містять до 0,1 г алюмінію);
- характерна форма;
- неоднорідності шару ґрунту, що покриває міну.

Крім основних, виділяють ще й додаткові демаскуючі фактори, щоправда, вони можуть бути присутні далеко не завжди [5]:

- наявність годинникового механізму чи електронного таймера;
- наявність сейсмічного, магнітного чи оптичного датчика цілі;
- наявність радіоприймача або провідних ліній керування.

Таким чином, міну може бути виявлено за рахунок трьох основних факторів [5]:

- скупчення певної маси конкретної вибухової речовини;
- характерної форми і розмірів;
- порушення однорідності шару ґрунту в місці встановлення.

Очевидно, що при дистанційному виявленні вибухонебезпечних предметів лише певна частина із зазначених факторів буде грати важливу роль. Переважна більшість методів дистанційного виявлення базуються на опромінюванні ділянки поверхні хвилями певної частоти й амплітуди й аналізі хвилі, що відбилася, бо саме вона несе в собі необхідну інформацію (корисний сигнал). Залежно від того, яким саме чином отримується корисний сигнал, виділяють різні методи пошуку вибухових пристроїв, загальну класифікацію яких наведено на рис. 1 [1].

Лазерна Раманівська спектроскопія. В рамках даної статті розглянемо, як саме здійснюється обробка та розпізнавання отриманого сигналу комбінаційного розсіювання для ідентифікації досліджуваного матеріалу. Модуль ідентифікації повинен надавати відповідь на питання: чим є матеріал (він може бути безпечним чи вибухонебезпечним, органічним чи неорганічним)? Цю задачу вирішують за допомогою ймовірнісного припущення щодо типу матеріалу. Послідовність обробки сигналу поділяється на дві основні фази:

- навчання (побудова бібліотеки матеріалів);
- оцінювання (залучення).

Під час фази навчання набір визначених матеріалів слід передати в навчальний модуль для створення бібліотеки матеріалів, а під час фази тестування невідомий матеріал має бути досліджено на предмет безпечності. Архітектуру інформаційної системи, що використовується при спектроскопії, представлено на рис. 2 [2].

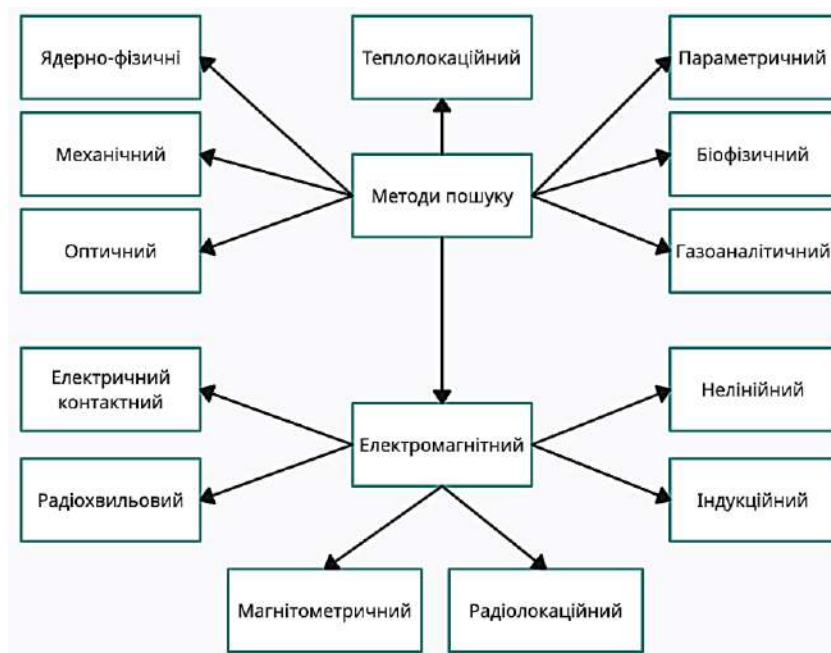


Рис. 1. Класифікація існуючих методів пошуку вибухонебезпечних пристроїв

Після опромінення досліджуваного матеріалу лазерним джерелом, зворотно розсіяний сигнал комбінаційного розсіювання, отриманий установкою, представляється у вигляді відповідних даних, які записуються у спеціальний файл, що автоматично створюється і зберігається в попередньо визначеному місці. Після читання файлу розпочинається процес попереднього кондиціонування, щоб підготувати отриману інформацію до розпізнавання [3]. У свою чергу, він складається із послідовності таких обов'язкових етапів: фільтрації, масштабування та нормалізації.

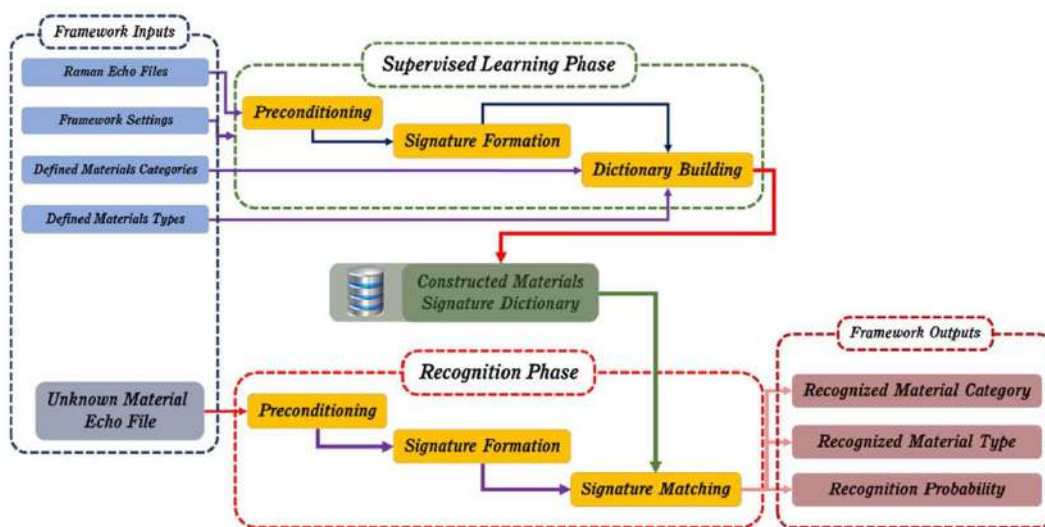


Рис. 2 Архітектура інформаційної системи для використання Раманівської спектроскопії

Фільтрація має на меті покращити співвідношення сигнал/шум шляхом видалення накладеного шуму за допомогою одновимірного Гауссового ядра.

Використання саме цього ядра забезпечує максимізацію швидкості розпізнавання і мінімізацію кількості неоднозначностей. Підпроцеси масштабування та нормалізації спрямовані на приведення до єдиної масштабної шкали для всіх отриманих зворотно розсіяних сигналів комбінаційного розсіювання від різних матеріалів.

Під час фази навчання запропонована структура зберігає отриманий і оброблений сигнал комбінаційного розсіювання у зворотному напрямку та створює еквівалентний сигнатурний матеріал, використовуючи версію оригінального зворотного розсіювання ущільненої форми після видалення спотворень сигналу за допомогою підходу ущільнення, щоб створити бібліотеку підписів матеріалу. Ця бібліотека має бути еталоном для запропонованої структури.

На етапі навчання вирішуються такі підзадачі:

1. Навчання під наглядом. За допомогою навчання під наглядом запропонована структура вивчає категорії та типи матеріалів, які знаходяться під наглядом оператора системи. Оператор передає в систему попередньо визначені дані про матеріал: сигнатуру матеріалу, створену з переданих даних, категорію та тип матеріалу, на основі правил генерації підпису матеріалу, як показано на рис. 3 [4].

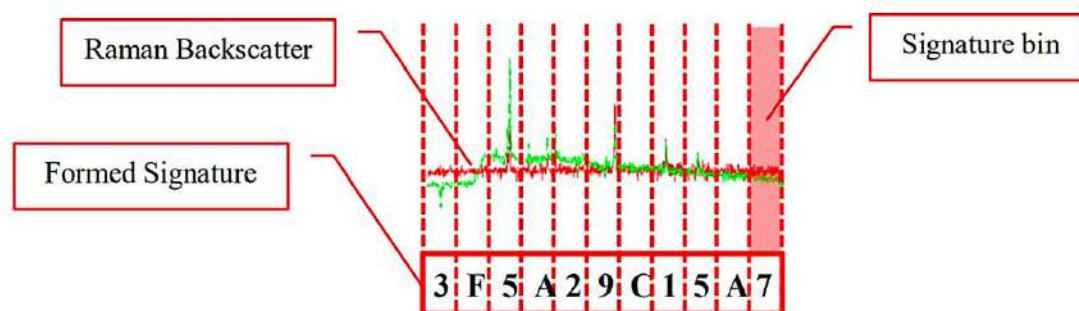


Рис. 3 Ілюстрація формування підпису матеріалу

2. Формування підпису. Унікальна сигнатура матеріалу, сформована шляхом ущільнення отриманого попередньо зумовленого сигналу комбінаційного розсіювання у зворотному напрямку перетворюється у вектор сигнатури постійної ширини, який описує унікальний шаблон матеріалу. Формування сигнатур за допомогою ущільнення може маскувати різні варіанти для того самого матеріалу, що може призвести до помилкового виявлення або розпізнавання. Раманівське зворотне розсіювання, поділене на попередньо визначену кількість ділянок, що дорівнює ширині вектора сигнатури, тоді як кожна ділянка стискає медіанне значення для відповідних рівнів зворотного розсіювання за допомогою схеми алгоритму формування сигнатури [4].

3. Створення бібліотеки. На цьому етапі створюється бібліотека матеріалів шляхом завантаження всіх файлів сигналу комбінаційного розсіювання певного матеріалу в режимі виправлення, системний тренер дає йому назву та категорію. Бібліотека матеріалів збирає всі сигнатури навчених матеріалів у організованій формі, щоб полегшити пошук і зіставлення підписів. Бібліотека організована відповідно до категорії матеріалу та типу матеріалу для виправлень, щоб прискорити підпроцес зіставлення, а її структуру показано нижче на рис. 4 [2].

Фаза залучення. На цьому етапі запропонована структура бере участь у дослідницькому каналі та починає розпізнавати матеріали, які проходять через цей канал. Правильний рівень розпізнавання в основному залежить від кількості навчених матеріалів і кількості записів того самого матеріалу за різних умов і обставин [2]. На етапі залучення вирішуються описані нижче підзадачі.

Співставлення підписів. На цьому кроці виконується процес співставлення між сформованою сигнатурою для досліджуваного матеріалу та навченими сигнатурами, що зберігаються у створеній бібліотеці. Процес узгодження використовує кореляцію Пірсона для досягнення кількісного критерію узгодження [4].

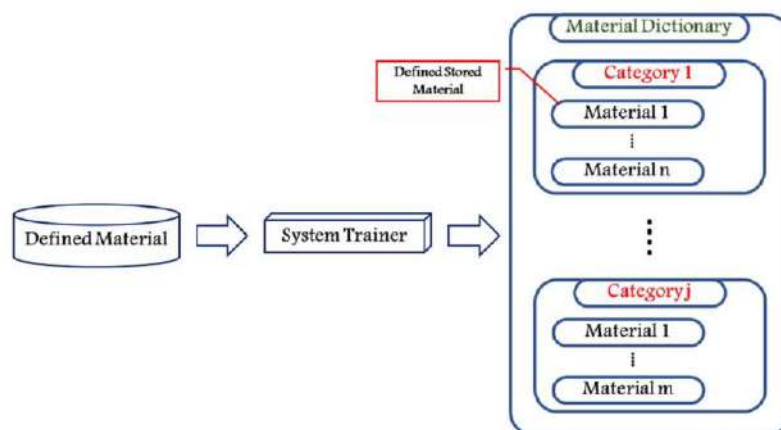


Рис. 4. Структура бібліотеки, створеної на етапі навчання

Автономне регулювання чутливості. Запропонована структура не залежить від ідеальної відповідності між сигнатурою досліджуваного матеріалу та сигнатурами, що зберігаються в бібліотеці. Зіставлення сигнатур може здійснюватися за допомогою попередньо визначеного рівня чутливості або його можна налаштувати на автономне сканування рівня чутливості, доки збережена бібліотечна сигнатура не буде збігатися із досліджуваною сигнатурою на заданому рівні чутливості [2].

Виявлення в реальному часі. Запропонована структура за нормальних умов і відкритого налаштування чутливості виявляє ціль протягом декількох мілісекунд в результаті оптимізації отримання бібліотеки, що можна вважати розпізнаванням у реальному часі. Досягається це за рахунок того, що словник матеріалів (або бібліотека) зберігається за категоріями з мітками та адресами для кожної категорії та типу матеріалу; фаза залучення перетворює весь словник на єдину матрицю для полегшення та прискорення процесу пошуку відповідно до попередньо визначеної чутливості.

Візуальне порівняння сигнатур. Запропонована структура включає візуальне представлення сигнатур досліджуваного матеріалу (крива сигнатур) на додаток до розпізнаних сигнатур можливих матеріалів для підтримки прийняття рішень оператором, як показано на рис. 5 (тут червоним кольором показана крива сигнатури досліджуваного матеріалу, а зеленим – якогось розпізнаного раніше).

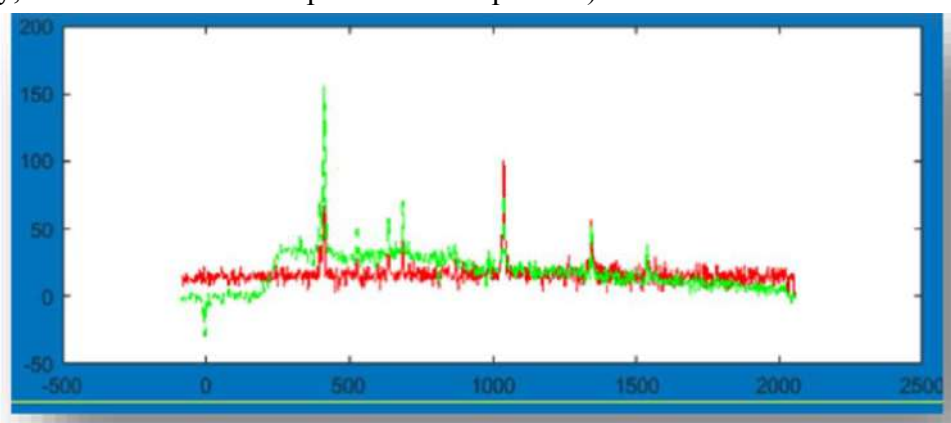


Рис. 5 Візуальне порівняння в реальному часі

Виявлення об'єкта. У разі виявлення небезпечного матеріалу, запропонована структура надсилає попереджувальні сигнали (сирена) та візуальне повідомлення, які попереджають оператора про ймовірну загрозу (а на додаток – ще й імовірний тип та співвідношення імовірностей відповідно до налаштувань чутливості) [3].

Георадар. Моностатичні системи. Моностатичні георадари належать до найпростіших архітектур і використовуються досить рідко. Основна перевага цих систем базується на використанні єдиної антени, що спрощує як компенсацію зв'язків, так і процедуру вимірювань. Послідовність кроків вимірювань на шляху сканування можуть мати будь-яку щільність. Структурну схему сучасного моностатичного георадара наведено на рис. 6 [5].

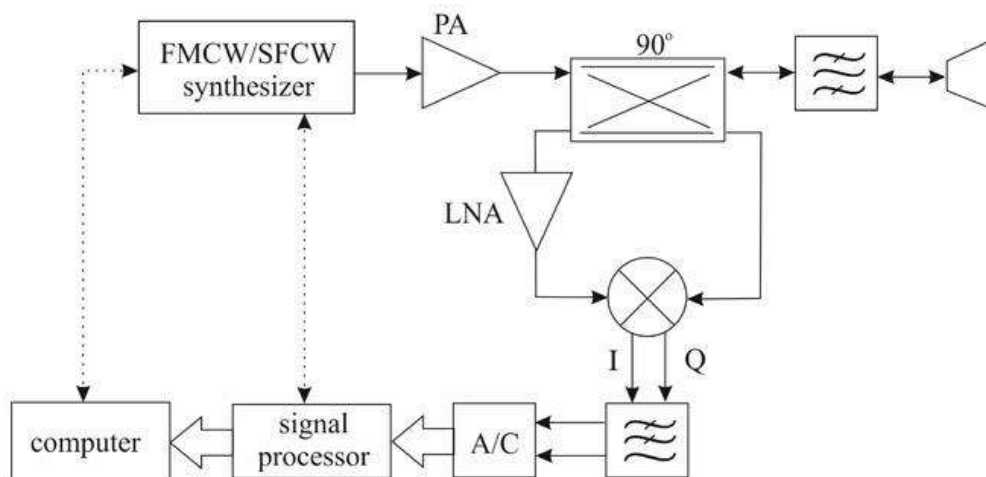


Рис. 6. Структурна схема моностатичного георадара

Сигнал FMCW/SFCW (Frequency-Modulated Continuous Wave/Stepped Frequency Continued Wave) від синтезатора надсилається через направлений зв'язувач до антени, а потім – до шарів ґрунту. Відбитий від цілі сигнал приймається тією ж антеною. Оскільки частота змінюється певним чином, прийнятий сигнал має нижчу частоту, ніж переданий. Різниця між частотами пропорційна часовій затримці від передачі до прийому, а час визначається відстанню від антени до відбивача (цілі) і назад. Ця різниця виділяється за допомогою квадратурного змішувача. Приріст значення частоти в синтезаторах вибирається таким чином, щоб забезпечити незначне частотно залежне зменшення глибини проникнення в кожен ґрунт. Це типовий прийом прямого перетворення. Щоб відійти від нульової різниці частот, часто використовується додаткова лінія затримки. Застосування 90° направленого зв'язувача та квадратурного виявлення спрощує цифрову обробку сигналу [6].

Серйозним недоліком моностатичної системи є подвоєння і кореляція перешкод, а також дуже жорсткі вимоги до якості направленого зв'язувача. Це має істотний вплив на небажані струми витоку між передавачем і приймачем. Витоки зменшують чутливість приймача і, отже, динаміку системи. Для компенсації витоків можна застосувати додатковий з'єднувач і регульований фазообертальний пристрій. Вдосконалену структуру моностатичного георадара зображено на рис. 7 [5].

У цій конфігурації витоки сигналу не заважають один одному за умови, що сигнал від кола зв'язувача, підключеного до синтезатора, точно налаштований відносно посилення та зсуву фази.

Окремою проблемою в системах CWGPR (Continued Wave Ground Penetrating Radar) є складність отримання постійного приросту частоти під час генерації зондуючого сигналу. Комерційні готові генератори (COTS – Commercial off-the-shelf), які зазвичай є джерелом сигналу, мають нелінійність близько 2 %, тоді як очевидне погіршення вихідного сигналу спостерігається вже при відхиленні у 0,1 %. Це погіршення сигналу є відповідальним за помилкове відлуння, що з'являється на радіолокаційних зображеннях.

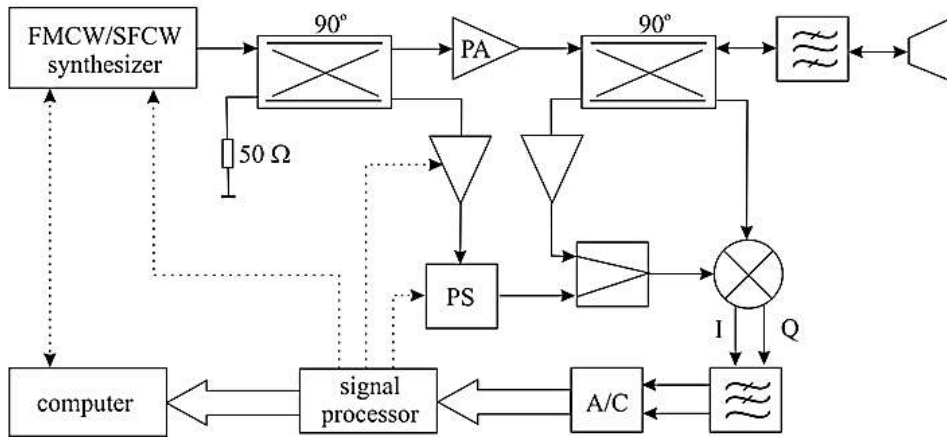


Рис. 7. Структура моностатичного георадара

Георадар. Бістатичні системи. У бістатичних системах тракти передавача і приймача просторово розділені. Це дозволяє уникнути проблеми подвоєння та кореляції перешкод, за рахунок ускладнення геометрії вимірювання. Система може працювати без циркуляційних насосів, перемикачів або направляючих муфт, що дозволяє досягти кращого, порівняно з моностатичними системами, розділення між трактами передавача та приймача та значно збільшити динаміку системи. Крім того, бістатична архітектура георадарної системи полегшує використання кількох приймачів.

Основна відмінність між окремими конструкціями (як моно-, так і бістатичними) виникає через структуру джерела сигналу CW (Continuous Wave). Георадар високої роздільної здатності працює на частотах від 0,4 ГГц до майже 4 ГГц, тоді як осцилятори керування напругою COTS з прийнятно низьким рівнем фазового шуму можуть бути налаштовані в діапазоні 80% від їх центральної частоти. У цьому випадку згадана пропускна здатність недоступна. З цієї причини такі пристрої не можна використовувати в системах високої роздільної здатності. Цю незручність можна вирішити кількома способами. Один із них вимагає застосування VCO (Voltage-Controlled Oscillator) з відносно вузькою смугою та центральною частотою, розташованою набагато вище необхідної. Радарний сигнал генерується в процесі перетворення частоти зі збереженням ширини смуги. Схематичний вигляд рішення представлено на рис. 8 [7].

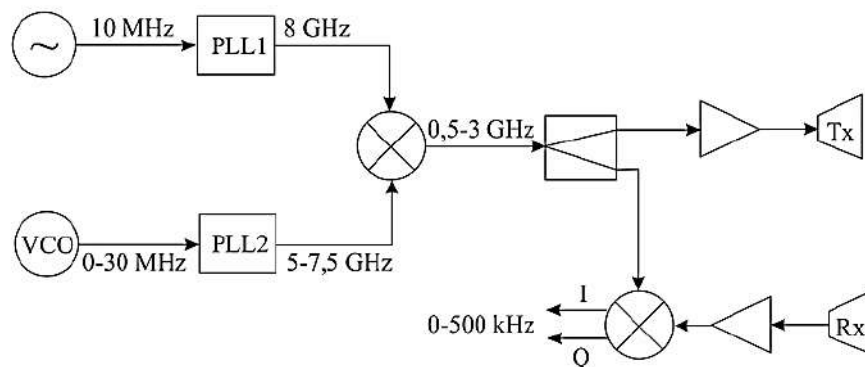


Рис. 8. Структурна схема бістатичної системи з пониженням перетворення смуги

Таке рішення застосовано в системі WISDOM. Фазовий автопідстроювач частоти (PLL1) збільшує частоту кварцевого джерела до значення, розташованого набагато вище центральної частоти системи. PLL2 помножує сигнал від регульованого вузько смугового

джерела та генерує стабільний сигнал зі смугою пропускання 2,5 ГГц і центральною частотою 6,25 ГГц. Сигнали з PLLs змішуються для отримання диференціальних частот від 0,5 ГГц до 3 ГГц. У такому рішенні багато небажаних продуктів змішування розміщуються поза смугою радіолокації. Через низьку частоту джерел їх можна замінити генераторами прямого цифрового синтезу (DDS – Direct Digital Synthesis) [8].

Системи, які використовують DDS для отримання прямої генерації сигналу в надширокій смузі (наприклад, від 1 ГГц до 3 ГГц), все ще належать до експериментальних або лабораторних рішень. Суттєвим недоліком систем прямого синтезу є низька чистота генерованого спектра.

Зразкове рішення, представлене на рис. 8, має деякі серйозні недоліки: вимагає застосування PLL, що має смугу пропускання, рівну призначеній. Його можна обійти за допомогою перетворення частоти та застосування схем подвоєння частоти, як показано на рис. 9.

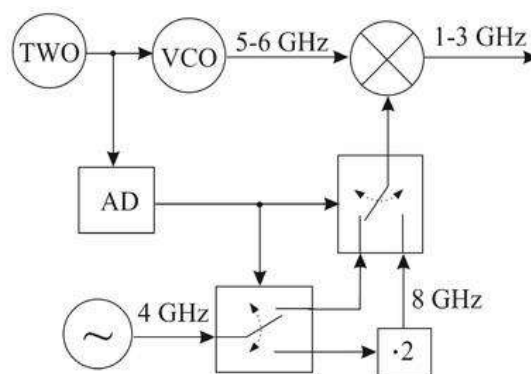


Рис. 9. Генератор надширокопasmового сигналу з перетворенням і подвоєнням частоти

У такій конфігурації згенерований сигнал складається з двох однакових піддіапазонів. Нижній піддіапазон генерується під час збільшення напруги на TWO (Triangular Waveform Oscillator) та відповідної частоти VCO від 5 ГГц до 6 ГГц; верхня підсмуга – при зниженні цих значень. У першому випадку сигнал від VCO змішується з частотою 4 ГГц, а в другому – із частотою 8 ГГц. Перемикання частот починається після виявлення мінімуму або максимуму TWO амплітуд. В результаті вихідний сигнал є сумою двох піддіапазонів: 1-2 ГГц і 2-3 ГГц. Існує багато варіантів поєднання ключів, гетеродинів і VCOs [7].

Пристрої векторних аналізаторів мереж. Коли швидкість сканування та максимальна дальність георадару не важливі та немає потреби у багатоканальних вимірюваннях, для проникнення в ґрунт можна застосувати векторний мережевий аналізатор (VNA – Vectors Network Analyzer) та взаємодіючий комп'ютер із відповідним програмним забезпеченням [9]. VNA дозволяє вимірювати комплексні коефіцієнти передачі та відбиття двопортової мережі у фіксованому діапазоні частот. У георадарних вимірюваннях антенна система та середовище розповсюдження відіграють роль тестового пристрою. Обладнання може працювати як в моно-, так і в бістатичному режимі в залежності від налаштувань вимірювання-розрахунку коефіцієнта відбиття та пропускання відповідно.

Застосування VNA для цієї мети в минулому було виправданим лише для лабораторних експериментів. Доступні ціни на обладнання, зменшення габаритів і збільшення швидкості вимірювання змінили цю ситуацію. Кожен VNA складається з компонентів, типових для георадара, тобто надширокопasmового джерела SFCW, спрямованих зв'язувачів, частотних змішувачів, детекторів і блоку обробки цифрового сигналу. Приклад функціональної схеми наведено на рис. 10 [8].

Сучасні VNA часто мають можливість обчислення зворотного перетворення Фур'є за допомогою вбудованого DSP (Digital Signal Processor), тому отримані вихідні дані представлені у часовій області, що полегшує подальшу обробку даних. Різноманітність варіантів вимірювання робить рішення популярним для багатьох застосувань. Варто зазначити, що ринок електронного обладнання пропонує досить хороші та дешеві VNA для цілей, які не потребують значної швидкості сканування [5, 9].

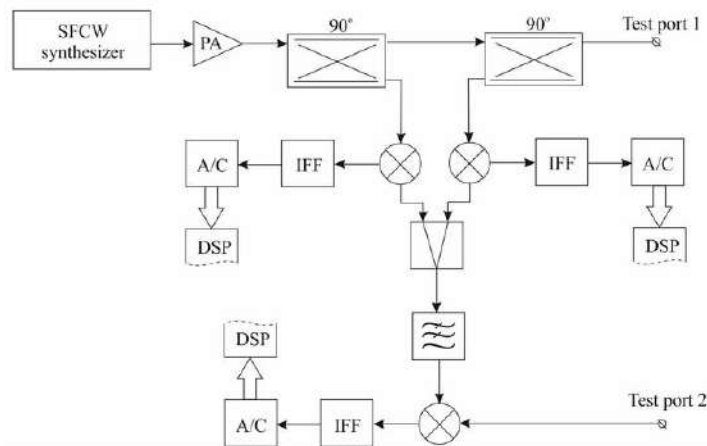


Рис. 10. Функціональна схема VNA

Метод пошуку вибухонебезпечних речовин за допомогою терагерцового сигналу. Терагерцова спектроскопія в часовій області (THz-TDS – TeraHertz Time-Domain Spectroscopy) має велике значення для хімії, матеріалознавства та медицини.

Спектральний діапазон від 0,1 ТГц до 10 ТГц (довжина хвилі від 3,3 см до 0,33 см відповідно) є важливою областю для низькочастотної діелектричної релаксації та коливальної спектроскопії рідин, таких як вода, метанол, етанол, пропанол та ін. Це також було особливо важливо для вивчення низькочастотних мод у молекулярних кристалах. THz-TDS у поєднанні із теорією функціонала густини можна використовувати для вивчення амінокислот, пептидів, ліків і вибухових речовин. Останні два особливо цікаві завдяки здатності терагерцового випромінювання проникати крізь одяг і упаковку. Існують також програми, в яких THz-TDS оптимізовано для виявлення бомб, наркотичних засобів і зброї [10].

У галузі матеріалознавства THz-TDS ідеально підходить для вимірювання мобільних носіїв заряду, оскільки вони відбивають і поглинають THz-випромінювання. THz-TDS використовувався для вимірювання електропровідності, топологічних ізоляторів і надпровідників, а також фазових переходів у цих матеріалах. Довжина хвилі становить близько 300 мкм, тому цілі критерію субхвилі легко досягаються за допомогою сучасних літографічних методів. Крім того, відсутність класичних оптичних компонентів у цьому частотному діапазоні викликала дослідження в царині ТГц метаматеріалів. Фільтри на основі мета матеріалів (статичні та динамічні), лінзи, направляючі промені та ідеальні поглиначі були охарактеризовані за допомогою THz-TDS. Яскраве різноманіття застосувань призвело до появи великої кількості різних конфігурацій ТГц-спектрометрів.

Спектроскопія стосується енергії, довжини хвилі або частоти фотонів, які проходять через зразок. У випадку THz-TDS сигнал у часовій області безпосередньо вимірює перерідне електричне поле, а не його інтенсивність [11].

Напруженість електричного поля на детекторі зазвичай становить 10-100 В/см і має тривалість у кілька пікосекунд. Тому потрібен швидкий і чутливий метод виявлення електричного поля. Прямі електричні детектори та схеми, зазвичай, мають час наростання та спаду в діапазоні від піко- до наносекунд, і тому вони не мають достатньо високої роздільної здатності за часом. Спосіб досягнення субпікосекундної роздільної здатності

полягає у використанні оптичних методів, у яких ультракороткий оптичний імпульс ближнього інфрачервоного випромінювання (зазвичай коротший за 100 фс) розділяє промінь уздовж двох шляхів для генерації та виявлення залежного від часу ТГц поля [11].

Вимірювання в часовій області базується на вибірці невідомого ТГц поля за допомогою відомого фемтосекундного лазерного імпульсу, який називається імпульсом зчитування. THz-TDS використовує згортку короткого імпульсу зчитування з довшим імпульсом THz. Для виконання цієї згортки можна використовувати кілька різних методів. Усі ці детектори мають дві спільні риси: вони вимірюють ТГц поле, а не інтенсивність, і сигнал виходить лише тоді, коли оптичний імпульс зчитування надходить одночасно з ТГц імпульсом.

Той факт, що детектор є чутливим лише тоді, коли обидва імпульси надходять одночасно, і що оптичний імпульс значно коротший за ТГц імпульс, дозволяє вимірювати ТГц поле як функцію часу. Крім того, детектор чутливий до знаку електричного поля. Тобто ми вимірюємо залежну від часу амплітуду $E(t)$, на відміну від інших методів, таких як FTIR (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy), які вимірюють лише інтенсивність ($E^2(t)$) електромагнітного сигналу і, отже, не фіксують інформації про фазу [13].

Вимірний сигнал відповідає амплітуді ТГц поля в один момент часу (t_1). Наступним кроком є вимірювання сигналу в усі моменти часу. Це досягається шляхом затримки імпульсу зчитування відносно ТГц імпульсу за допомогою механічної лінії затримки. Вихід лазера розбивається на два промені: один із променів використовується для генерації ТГц випромінювання, а інший є променем зчитування, який його виявляє. Часова затримка досягається збільшенням довжини шляху одного з пучків. Час проходження лазерного імпульсу становить 30 см/нс, або 300 мкм/пс, що вирішує проблему фемтосекундної часової роздільної здатності до мікрометрової просторової роздільної здатності. Точне мікропозиціонування досягається за допомогою етапів позиціонування, керованих комп'ютером. У THz-TDS (і надшвидкої спектроскопії в цілому) ці етапи зазвичай називаються лініями затримки. Час затримки в обидві сторони змінюється на 6,6 фс для кожного мікрона зміщення лінії затримки. Швидкість руху лінії затримки визначає швидкість дискретизації в часовій області. Тому прийнято вказувати швидкість лінії затримки в пс/с [12].

Водяна пара має сильні характеристики поглинання в діапазоні ТГц, що може заважати вимірюванням. Щоб мінімізувати це поглинання, траєкторія ТГц променя поміщається в камеру продувки (як показано на рис. 11), яка продувається сухим повітрям або азотом. Крім того, корпус також можна завакуумувати, але це вимагає значно кращого рівня проектування.

Система, зображена на рис. 11, використовує геометрію передачі THz-TDS, яка є найпростішою, але також можна вимірювати ТГц імпульс, відбитий від зразка, або використовувати геометрію ослабленого повного відбиття. Крім того, THz-TDS також можна використовувати для виявлення зразка в ближньому полі [10].

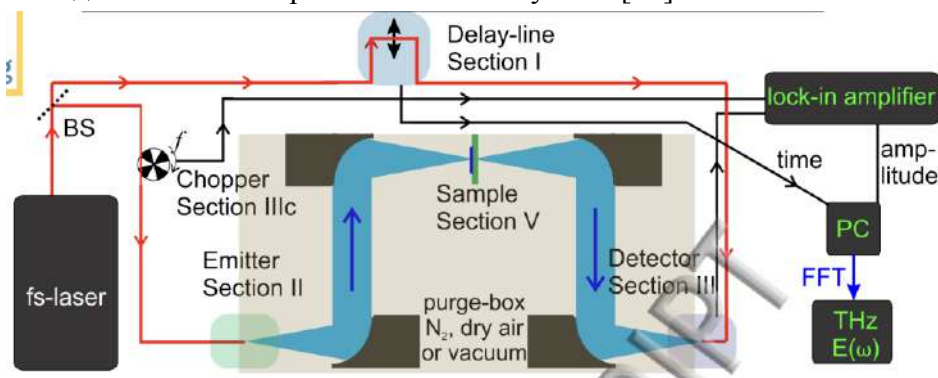


Рис. 11. Спрощений THz-спектрометр у часовій області (THz-TDS)

Висновки. У цій статті було досліджено лише невелику частину методів виявлення вибухонебезпечних речовин серед усіх існуючих, які, на думку авторів, є найперспективнішими для вирішення задач гуманітарного розмінування в умовах повномасштабної війни нашої країни. Для кожного із методів наведено результати експериментального застосування, а також визначено переваги і недоліки, зокрема:

– Раманівська спектроскопія вимагає досить складного і дороговартісного обладнання, яке дозволить точно зафіксувати спектри вибухонебезпечних речовин, її результати дозволяють виявляти такі речовини у великих обсягах, щоправда, тільки у незмаскованому вигляді;

– георадар дозволяє виявляти вибухівку у прихованому вигляді, оскільки його випромінювання може проникати крізь різні поверхні і матеріали, цей метод є відносно більш дешевим і не вимагає надскладного обладнання;

– застосування терагерцового сигналу також вимагає складного і дороговартісного обладнання, але дає можливість виявляти вибухові речовини у дуже малих обсягах.

Із зазначеного можна зробити висновок, що застосування георадара є найбільш прийнятним методом виявлення вибухових предметів для гуманітарного розмінування.

Список використаних джерел

1. Amazeen, C. A. Developmental status of the U.S. Army's new handheld standoff mine detection system (HSTAMIDS) / C. A. Amazeen, M. C. Locke // Proceedings of the 2nd International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines. – 1998. – № 458. – Pp. 193-197.
2. Ayoub, H. S., Mokhtar, A. M., El-Sherif, A. F., Elbashar, Y. H.: Modified range equation for exact modeling and design optimization of active laser remote sensing systems / H. S. Ayoub, A. M. Mokhtar, A. F. El-Sherif, Y. H. Elbashar // Opt. Quantum Electronics. – 2021. – № 35(110). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02759-5>.
3. Raman spectroscopy applications in forensic science / S. R. Khandasamy, M. A. Fikiet, E. Mistek, Y. Ahmed, L. Halámková, J. Bueno, I. K. Lednev // Forensic Chem. – 2018. – № 8. – Pp. 111-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.02.002>.
4. Advances in explosives analysis—part II: photon and neutron methods / K. E. Brown, M. T. Greenfield, S. D. McGrane, D. S. Moore // Anal. Bioanal Chem. – 2016. – № 408(1). – C. 49-65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-015-9043-1>.
5. Stec, B. Theory and measurement of signal-to-noise ratio in continuous-wave noise radar / B. Stec, W. Susek // Sensors. – 2018. – №18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18051445>.
6. Zastosowanie radaru szumowego do wykrywania obiektów ukrytych w gruncie / W. Susek, B. Stec, M. Kniola, M. Czyzewsk // Przegląd Elektrotechniczny. – 2018. – № 1(4). – Pp. 173-177. DOI: 10.15199/48.2018.04.39.
7. A novel monostatic concurrent multiband radar front-end architecture and its dual-band implementation,” AEU / M. Li, Y. Wu, L. Jiao, Y. Liu // International Journal of Electronics and Communications. – 2018. – № 89. DOI: 10.1016/j.aeue.2018.03.030.
8. Monostatic continuous-wave radar integrating a tunable wideband leakage canceler for indoor tagless localization / M. Mercuri, P. Barmuta, P. J. Soh, P. Leroux, D. M.-P. Schreurs // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2017. – № 9(8). – Pp. 1-8. DOI: 10.1017/S1759078717000551.
9. Pieraccini, M. No-contact GPR for investigating painted walls / M. Pieraccini, L. Miccinesi / 17th International Conference on Ground Penetrating Radar. – 2018. DOI: 10.1109/ICGPR.2018.8441580.
10. Security applications of terahertz technology / M. C. Kemp, P. F. Taday, B. E. Cole, J. A. Cluff, A. J. Fitzgerald, W. R. Tribe // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 5070. DOI: 10.1117/12.500491
11. Spectroscopic characterization of explosives in the far infrared region / Y. Chen, H. Liu, Y. Deng, D. Veksler, M. Shur, X. -C. Zhang, D. Schauki, M. J. Fitch and R. Osiander // Terahertz for Military and Security Applications II / R. J. Hwu, D. L. Woolard, eds. – Proc. SPIE 5411, 2004. – Pp. 1-8.

12. Noninvasive inspection of C-4 explosive in mails by terahertz time-domain spectroscopy / K. Yamamoto, M. Yamaguchi, F. Miyamaru, M. Tani, M. Hangyo, T. Ikeda, A. Matsushita, K. Koide, M. Tatsuno, Y. Minami // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2004. – № 43. – Pp. 414-417.

13. Terahertz study of 1,3,5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy / F. Huang, B. Schulkin, H. Altan, J. F. Federici, D. Gary, R. Barat, D. Zimdars, M. Chen, D. B. Tanner // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – № 85. – Pp. 5535-5537.

References

1. Amazeen and Locke, M. C. (1998). Developmental status of the U.S. Army's new handheld standoff mine detection system (HSTAMIDS). *Proceedings of the 2nd International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines*, 458, 193–197.

2. Ayoub, H. S., Mokhtar, A. M., El-Sherif, A. F., Elbashar, Y. H. (2021). Modified range equation for exact modeling and design optimization of active laser remote sensing systems. *Opt. Quantum Electronics*, 35(110). <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02759-5>.

3. Khandasammy, S.R., Fikiet, M.A., Mistek, E., Ahmed, Y., Halámková, L., Bueno, J., Lednev, I.K. (2018). Raman spectroscopy applications in forensic science. *Forensic Chem.*, 8, 111–133. <https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.02.002>.

4. Brown, K.E., Greenfield, M.T., McGrane, S.D., Moore, D.S. (2016). Advances in explosives analysis—part II: photon and neutron methods. *Anal. Bioanal Chem.*, 408(1), 49–65. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-9043-1>.

5. Stec, B., Susek, W. (2018). Theory and measurement of signal-to-noise ratio in continuous-wave noise radar. *Sensors*, 18. <https://doi.org/10.3390/s18051445>.

6. Susek, W., Stec, B., Kniola, M., Czyzewski, M. (2018). Zastosowanie radaru szumowego do wykrywania obiektów ukrytych w gruncie. *Przegląd Elektrotechniczny*, 94(4).

7. Li, M., Wu, Y., Jiao, L., Liu, Y. (2018). A novel monostatic concurrent multiband radar front-end architecture and its dual-band implementation. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.03.030>.

8. Mercuri, M., Barmuta, P., Soh, P. J., Leroux, P., Schreurs, D. M.-P. (2017). Monostatic continuous-wave radar integrating a tunable wideband leakage canceler for indoor tagless localization. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(8). <https://doi.org/10.1017/S1759078717000551>.

9. Pieraccini, M., Miccinesi, L. (2018). No-contact GPR for investigating painted walls. *17th International Conference on Ground Penetrating Radar*. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441580>.

10. Kemp, M. C., Taday, P. F., Cole, B. E., Cluff, J. A., Fitzgerald, A. J. and Tribe, W. R. (2003). Security applications of terahertz technology. *Terahertz for Military and Security Applications*. Proc. SPIE 5070, 44-52.

11. Chen Y., Liu H., Deng Y., Veksler D., Shur M., Zhang X.-C., Schauki D., Fitch M. J. and Osiander, R. (2004). Spectroscopic characterization of explosives in the far infrared region. *Terahertz for Military and Security ApplicationsII*, Proc. SPIE 5411, 1-8.

12. Yamamoto, K., Yamaguchi, M., Miyamaru, F., Tani, M., Hangyo, M., Ikeda, T., Matsushita, A., Koide K., Tatsuno, M. and Minami, Y. (2004). Noninvasive inspection of C-4 explosive in mails by terahertz time-domain spectroscopy. *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, 414-417.

13. Huang F., Schulkin B., Altan H., Federici J. F., Gary D., Barat R., Zimdars D., Chen M. and Tanner, D. B. (2004). Terahertz study of 1,3,5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 85, 5535-5537.

Отримано 18.03.2024

Artem Syguta¹, Oleksii Krasnozhan²

¹PhD student of the Department of Information and Computer Systems, group ASD-122-22
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: syguta@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-8328-1277>

²PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>, **ResearcherID:** G-4623-2014

RESEARCH OF METHODS OF SEARCHING FOR EXPLOSIVE OBJECTS

The study of methods of searching for explosive objects is an important problem, as it allows to determine the effectiveness of the application of each of the existing methods, which is extremely important for the safety of civilians who are in war conditions, and also allows to prevent possible terrorist acts. This article examines three main methods: laser Raman spectroscopy, ground-penetrating radar, and the terahertz search method.

Laser Raman spectroscopy is one of the rather promising methods for the study of explosive objects. It is based on the analysis of the spectrum of light scattered after illumination with a laser beam. Each substance has its own characteristic scattered spectra that can be used for its identification. Laser Raman spectroscopy is highly specific and sensitive to the chemical composition of materials, including explosive substances. It can be applied for non-invasive and rapid detection of such substances, even if they are present in large volumes.

GPR is another method for finding explosive objects. It uses radio wave radiation to measure the properties of materials and can detect changes caused by the presence of explosive substances. Ground-penetrating radar has high resolution and the ability to penetrate through different layers of materials, which makes it effective in detecting hidden objects.

The use of a terahertz signal is also a promising method in the search for explosive substances. It is based on the use of radiation in the terahertz frequency range, which is between the microwave and infrared ranges. This method is characterized by high sensitivity to chemical changes in materials and the ability to detect even very low concentrations of substances. The use of data processing algorithms and artificial intelligence contributes to the development of effective systems for detecting explosive materials.

A summary analysis of the latest research and publications indicates the effectiveness and perspective of the methods of terahertz technology, ground-penetrating radar and laser Raman spectroscopy in the detection of explosive objects. These methods are characterized by high sensitivity, specificity and the ability to work in real time. Additional research and development of these techniques can contribute to further improvements in security systems by effectively detecting and removing explosive objects to prevent potential hazards.

Key words: mines, explosive objects; search methods; georadar; Raman spectroscopy; terahertz technology.

Figures: 11. *References:* 13.

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-1(35)-170-177
УДК 665.347.8

Тетяна Денисенко¹, Крістіна Коваль², Вікторія Напалько³

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри підприємництва і торгівлі
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: tanjadeni@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7022-5884>
ResearcherID: G-6003-2014. **ScopusID:** 57210359056

²доктор філософії, викладач кафедри підприємництва і торгівлі
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: kristy80kv@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3796-6653>
ResearcherID: AAI-2121-2019

³здобувач вищої освіти група ПТ-221
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: papalkoviktoria@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-3428-429X>

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЯКОСТІ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ

У дослідженні проведено оцінювання якості соняшникової олії провідних виробників згідно з вимогами нормативної документації. Результати показали, що інформація, зазначена на етикетках, повністю відповідає встановленим вимогам. Органолептичні показники якості зразків олії задовільняють вимоги стандарту. Фізико-хімічні показники – йодне, кислотне та перекисне числа – знаходяться в межах вимог державного стандарту. Натомість за показником масової частки вологи та летких речовин доброякісними виявилися не всі досліджувані зразки.

Ключові слова. соняшникова олія; маркування; якість; органолептична оцінка; фізико-хімічні показники.
Рис.: 1 Табл.: 3. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Порівняльна оцінка дає змогу споживачам зробити свідомий вибір щодо вживання якісної та безпечної соняшникової олії й, відповідно, сприятливо впливає на їхнє здоров'я і економічний добробут.

Постановка проблеми. Серед загального споживання харчових жирів перше місце посідає споживання саме рослинних олій. Їхня частка в раціоні людей розвинених країн світу (Великої Британії, Данії, США, Канади, Італії) зростає, і на теперішній час становить 18-27 кг олії на одну людину на рік. Відповідно до норм, розрахованих українськими фізіологами, споживання олії має становити 13,2 кг на рік на 1 людину [1]. Рослинна олія – один з найкорисніших дієтичних продуктів, що не лише покращує смак їжі, а й зміцнює здоров'я людини. Наше тіло має потребу в жирах – вони добре впливають на нервову систему, мозок, шкіру та на здоров'я людини в цілому. Рослинні олії містять ненасичені жири, що є корисними для серця, мозку та загального стану здоров'я. Незамінні жирні кислоти, що їх містять рослинні олії, не виробляються організмом людини і мають надходити з їжею [2].

На полицях торговельних підприємств наявний доволі широкий асортимент рослинних олій, серед яких найбільша кількість представлена саме соняшниковою олією. Найпопулярнішу в Україні рослинну олію отримують з насіння соняшнику. До складу такої олії входять цінні для організму поживні речовини, а також вітаміни груп А, D, E і F. Згідно з ДСТУ 4492:2017 «Олія соняшникова. Технічні умови» олію соняшникову, залежно від технології виробництва і показників якості, поділяють на види, гатунки та марки, до кожного з яких висуваються певні якісні вимоги. Здоровий спосіб життя передбачає якісне харчування. Соняшникова олія традиційно має доволі високу питому вагу в раціоні населення України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика якості та біологічної цінності харчових жирів висвітлена в роботах вітчизняних учених І. В. Сирохмана [3], Т. М. Лозової [4], С. В. Гирич, Г. С. Лояніч [5], В. М. Челябієвої [6]. Однак питання оцінки якості соняшникової олії досліджено недостатньо повно.

Головною метою цієї роботи є оцінка якості зразків соняшникової олії провідних товаровиробників відповідно до вимог чинної нормативної документації та заявленому маркуванню.

Виклад основного матеріалу. Класифікують соняшкову олію за способом отримання, за видом та способом очищення. Анкетне опитування споживачів показало, що більшість респондентів (70 %) надає перевагу олії соняшниковій рафінованій дезодорованій невимороженій. На другому місці (20 %) – олія рафінована виморожена, після того олія соняшникова нерафінована виморожена (пресова) (7 %), і на останньому місці - олія соняшникова нерафінована холодного пресування першого віджиму (3 %). Саме тому зазначені види соняшникової олії було обрано об'єктами нашого дослідження. Для проведення оцінки якості в торговельній мережі м. Чернігів було відібрано зразки соняшникової олії вітчизняних товаровиробників. Олія упакована в пляшки з прозорого поліетилентерефталату. На кожену пляшку наклеєна паперова етикетка. Додаткове маркування торгової марки на нижній частині кришки нанесено в зразках олії ТМ «Щедрий дар», ТМ «Олейна традиційна» та ТМ «Майола» Зовнішній вигляд зразків представлено на рис. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд пакувань досліджуваних зразків олії

Джерело: сформовано авторами.

На першому етапі дослідження було оцінено якість маркування зразків соняшникової олії відповідно до вимог Закону України «Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів» (далі по тексту Закон) [7]. Результати оцінювання якості маркування наведено в табл. 1.

Інформацію на всіх зразках подано державною (українською) мовою. Назва харчового продукту представлена у вигляді офіційної назви олії певної торгової марки, що повністю відповідає вимогам Закону. Уся обов'язкова інформація розміщена на етикетці зразків, крім дати виготовлення, що нанесена маркером на плечову частину пляшок. Розмір шрифту відповідає встановленим вимогам. Дані про харчову цінність найбільш повно представлені у зразку 4 – ТМ «Олейна традиційна». Якщо у більшості досліджуваних зразків виділений лише вміст жиру з уточненням насичених жирних кислот, то ТМ «Олейна традиційна» наводить ще й інформацію про вміст мононенасичених і поліненасичених жирних кислот та вітаміну Е токоферолу. Що стосується умов і термінів зберігання, то вони зазначені на маркуванні усіх зразків. Слід зауважити, що на зразках ТМ «Олейна традиційна» та ТМ «Стожар» зазначено термін придатності продукту після відкриття упаковки, в той час як інформація стосовно терміну придатності після відкриття пляшки не належить до обов'язкової. Цей факт свідчить про турботу виробника щодо стану здоров'я кінцевого споживача. За результатами оцінки якості маркування зразків соняшникової олії можна зробити висновок, що воно повністю відповідає встановленим вимогам щодо обов'язкової інформації про харчовий продукт.

Таблиця 1 – Оцінка якості маркування зразків соняшникової олії

Обов'язкова інформація	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4	Зразок 5	Зразок 6	Зразок 7	Зразок 8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
назва харчового продукту	«Щедрий дар» запашна нерафінована	Олія нерафінована «Розумний вибір»	«Чумак золота» соняшникова олія рафінована	ТМ «Олейна Традиційна»	Олія соняшникова рафінована «Своя лінія»	Олія соняшникова рафінована ТМ «Стожар»	«Майола» екстра рафінована	Олія «Щедрий дар»
склад (перелік інгредієнтів)	100% олія соняшникова нерафінована	Олія соняшникова нерафінована виморожена (пресована) вищого гатунку	Олія соняшникова рафінована дезодорована виморожена марки «П»	100% соняшникова рафінована олія дезодорована виморожена марки «П»	соняшникова рафінована олія дезодорована виморожена марки «П» (одежжана з суміші пресової та екстраційної олій)	Олія соняшникова рафінована дезодорована виморожена	Олія соняшникова рафінована дезодорована виморожена марки «П»	олія соняшникова рафінована дезодорована виморожена 100%
кількість харчового продукту в установлених одиницях вимірювання	0,85 л	0,85 л	0,9 л., 828 г	0,85 л., 782 г	0,9 л., 828 г	0,85 л., 782 г	1 л., 920 г	800 г
мінімальний термін придатності або дата «вжити до»	23.11.2023-23.11.2024	Вжити до 06.04.2025	07.05.2023-07.05.2025	26.01.2024-26.01.2026	06.12.2023-06.12.2025	12.12.2023-12.12.2025	11.10.2023-11.10.2025	14.11.2023-14.11.2025
будь-які особливі умови зберігання та/або умови використання	Зберігати 12 місяців в закритих затемнених приміщеннях за температури від 0°C до 30°C.	Зберігати в закритих затемнених приміщеннях за температури від 0°C до 30°C.	Зберігати в закритих затемнених приміщеннях в рекомендованому інтервалі температур від 0 до 30°C	Зберігати 24 місяці в закритих затемнених приміщеннях у рекомендованому інтервалі температур від 0°C до +30°C; після відкриття використати протягом 30 діб	Зберігати в закритих затемнених приміщеннях в рекомендованому інтервалі температур від 0 до 30°C	24 місяців від дати розливу зберігати при температурі від 0°C до +30°C, в темному місці. Після відкриття зберігати не більше 87 діб	24 місяці Зберігати в закритих затемнених приміщеннях в рекомендованому інтервалі температур від 0 до 30°C	зберігати в закритих затемнених приміщеннях за температури від 0°C до 30°C

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Найменування та місцезнаходження оператора ринку харчових продуктів, відповідального за інформацію про харчовий продукт	ПАТ «Полтавський олійноекстракційний завод – Кернел груп» Україна, 36007, Полтавська обл., м. Полтава, вул. Решетилівська, будинок 17	ПАТ «Полтавський олійноекстракційний завод – Кернел груп» Україна, 36007, Полтавська обл., м. Полтава, вул. Решетилівська, будинок 17	ПАТ «Полтавський олійноекстракційний завод – Кернел груп» Україна, 36007, Полтавська обл., м. Полтава, вул. Решетилівська, будинок 17. Виготовлено за ліцензією ПрАТ «Чумак» на замовлення ТОВ «Кернер-трейд»	«Дніпропетровський олійноекстракційний завод» Дніпропетровська обл., місто Дніпро, вул. Князя Ярослава Мудрого, 46.	ПАТ «Полтавський олійноекстракційний завод – Кернел груп». Виготовлено на замовлення ТОВ «АТБ-МАРКЕТ»	ПАТ «Полтавський олійноекстракційний завод – Кернел груп» Україна, 36007, Полтавська обл., м. Полтава, вул. Решетилівська, будинок 17	ПП «Оліяр» Україна, 81100, Львівська обл., Львівський район, м. Пустомити, вул. Привокзальна, будинок 25	ПАТ «Полтавський олійноекстракційний завод – Кернел груп» Україна, 36007, Полтавська обл., м. Полтава, вул. Решетилівська, будинок 17
інформація про поживну цінність харчового продукту	Енергетична цінність: 898ккал Жири 99,85 г з них: насичені 11 г вуглеводи 0 г з них: цукри 0 г Білки 0 г Сіль 0 г	Енергетична цінність: 898 ккал Жири 99,85 г Вуглеводи 0 г Білки 0 г Сіль 0 г	Енергетична цінність: 899ккал Жири 99,9 г з них: насичені 11,3 г вуглеводи 0 г з них: цукри 0 г Білки 0 г Сіль 0 г	Енергетична цінність: 900 ккал Жири 99,9 г з них: насичені 11 г мононенасичені 29 г; поліненасичені (омега 6) -60 г вуглеводи 0 г з них: цукри 0 г Білки 0 г Сіль 0 г Вітамін Е – 60 мг	Енергетична цінність: 899 ккал Жири 99,9 г з них: насичені 11,3 г вуглеводи 0 г з них: цукри 0 г Білки 0 г Сіль 0 г	Енергетична цінність: 899 ккал Жири 99,9 г з них: насичені 10,9 г Вуглеводи 0 г Білки 0 г	Енергетична цінність: 899 ккал Жири 99,9 г з них: насичені 11 г вуглеводи 0 г з них: цукри 0 г Білки 0 г Сіль 0 г	Енергетична цінність: 899ккал Жири 99,9 г з них: насичені 11 г вуглеводи 0 г з них: цукри 0 г Білки 0 г Сіль 0 г
Позначка ГМО	Без ГМО	Без ГМО	Без ГМО	Без ГМО	Без ГМО	Без ГМО	Без ГМО	Без ГМО
Мова та написи	Українська. Написи точні, чіткі, розбірливі, зрозумілі, розміщені на видному місці, не приховуються зображенням	Українська. Написи точні, чіткі, розбірливі, зрозумілі, розміщені на видному місці, не приховуються зображенням	Українська. Написи точні, чіткі, розбірливі, зрозумілі, розміщені на видному місці, не приховуються зображенням	Українська. Написи точні, чіткі, розбірливі, зрозумілі, розміщені на видному місці, наявні картинки є влучними та не перебивають текст	Українська. Написи точні, чіткі, розбірливі, зрозумілі, розміщені на видному місці, не приховуються зображенням	Українська. Написи точні, чіткі, розбірливі, зрозумілі, розміщені на видному місці	Українська. Написи точні, чіткі, розбірливі, зрозумілі, розміщені на видному місці, не приховуються зображенням	Українська. Написи точні, чіткі, розбірливі, зрозумілі, розміщені на видному місці, не приховуються зображенням

Джерело: розроблено авторами.

Наступним етапом дослідження стала органолептична оцінка якості зразків олії, що є важливим методом контролю та може допомогти гарантувати відповідність олії стандартам якості. Органолептична оцінка спрямована на виявлення дефектів олії, як от прогірклість, осад або сторонні запахи. За допомогою органів чуття було досліджено наступні показники олії: прозорість, колір, запах, смак.

Відповідно до ДСТУ [8] обрані для дослідження показники характеризуються наступним чином: прозорість – прозора без осаду, для нерафінованої олії допускається наявність «сітки»; смак і запах – притаманні олії соняшниковій без стороннього запаху, присмаку та гіркоти (для нерафінованої олії), притаманні олії соняшниковій рафінованій без стороннього присмаку, гіркоти та запаху (для рафінованої олії), смак знеособленої олії, без запаху (рафінованої дезодорованої олії). Узагальнені результати оцінки представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Оцінка якості зразків олії за органолептичними показниками

Вид зразка	Прозорість	Колір	Смак	Запах
Зразок 1	Прозора без осаду	Колір насичений, темний із золотистим відтінком	Приємний, без стороннього присмаку	Запах смаженого соняшника, легкий, приємний
Зразок 2	Прозора без осаду	Колір однорідний, темно-золотистий	Приємний, соняшковий, без сторонніх присмаків	Легкий, приємний, соняшковий
Зразок 3	Прозора без осаду	Світло-жовта	Без смаку	Без запаху
Зразок 4	Прозора без осаду	Блідо-жовта	Без смаку, без сторонніх присмаків	Без запаху, без сторонніх запахів
Зразок 5	Прозора без осаду	Світло-солом'яна	Без смаку	Без запаху
Зразок 6	Прозора без осаду	Солом'яна	Без смаку	Без запаху
Зразок 7	Прозора без осаду	Солом'яна	Без смаку	Без запаху
Зразок 8	Прозора без осаду	Блідо-жовта	Без смаку	Без запаху

Джерело: розроблено авторами.

За результатами оцінки якості зразків олії з використанням органолептичних показників встановлено, що вони повністю відповідають вимогам, встановленим ДСТУ 4492.

Наступним етапом було встановлення відповідності якості досліджуваних зразків вимогам нормативних документів за фізико-хімічними показниками. Результати досліджень наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати оцінки якості зразків олії за фізико-хімічними показниками

Вид зразка	Масова частка вологи та летких речовин, %	Йодне число, г йоду	Кислотне число, мг КОН/г	Пероксидне число, $\frac{1}{2}$ O ммоль/кг
Зразок 1	0,17	110	1,60	7,2
Зразок 2	0,15	109	1,50	7,5
Зразок 3	0,20	110	0,30	3,8
Зразок 4	0,10	125	0,34	3,5
Зразок 5	0,15	120	0,4	4,1
Зразок 6	0,21	120	0,41	4,0
Зразок 7	0,15	123	0,43	5,3
Зразок 8	0,18	118	0,56	5,6

Джерело: розроблено авторами.

Масова частка вологи та летких речовин – це показник, від якого залежить стабільність споживних властивостей олії. За підвищеної кількості зазначених речовин у продукті може розвиватися стороння мікрофлора, відбуватися гідроліз олії і, як наслідок, з'являються неприємні смак та запах. Відповідно до вимог стандарту для нерафінованої олії цей показник має бути не більшим за 0,2 %, а для рафінованої олії усіх видів - не більшим за 0,1 %. Аналізуючи дані таблиці 3, слід зазначити, що масова частка вологи та летких речовин перебуває в межах вимог стандарту у зразках нерафінованої олії 1 (ТМ «Щедрий дар») і 2 («Розумний вибір») та в зразку 4 рафінованої олії (ТМ «Олейна традиційна»). Щодо решти досліджуваних зразків – масова частка вологи перевищувала допустимі норми. Найвищий показник виявлено у зразку 6 - ТМ «Стожар».

Йодне число рослинної олії - це показник, який характеризує ступінь ненасиченості жирних кислот, що входять до її складу – виражається в грамах йоду, які можуть приєднатися до 100 г олії.

Чим більшим є йодне число, тим більше в олії ненасичених жирних кислот, та тим вище її схильність до висихання, згіркнення та інших змін під час зберігання. Низьке йодне число може бути ознакою того, що олія окислилась і стала прогірклою. Для доброякісної соняшникової олії йодне число має перебувати в межах 110-140 г. Досліджувані нами зразки олії мають йодне число, що відповідає доброякісній рослинній олії.

Кислотне число жиру характеризується кількістю мг КОН, що необхідна для нейтралізації вільних жирних кислот, які містяться в 1 г жиру. Зазвичай кількість вільних жирних кислот залежить від якості олії, технології виробництва та умов її зберігання. За порушення термінів та умов зберігання продукту, у ньому збільшується вміст вільних жирних кислот внаслідок гідролізу тригліцеридів. Кислотне число досліджуваних олій перебуває в межах норм стандарту для доброякісної олії.

Пероксидне число жиру – це показник, який характеризує ступінь окиснення жиру й визначається кількістю міліграмів активного кисню, що виділяється з 1 г жиру при його розкладанні. Відповідно до вимог ДСТУ у доброякісної рослинної олії пероксидне число не має перевищувати $10\frac{1}{2}$ О ммоль/кг. Досліджувані зразки соняшникової олії (табл. 3) повністю відповідають вимогам стандарту за цим показником.

Висновки. Соняшникова олія є доволі популярним продуктом харчування в Україні. Під час обрання олії важливо звертати увагу на інформацію, представлену на етикетці. Ми проаналізували маркування зразків соняшникової олії та оцінили його відповідність встановленим вимогам. Інформація щодо всіх зразків досліджуваної олії подана українською мовою, а назва продукту відповідає офіційній назві торгової марки. Уся обов'язкова інформація розміщена на етикетці, окрім дати виготовлення, що нанесена маркером на плечовій частині пляшок. Розмір шрифту відповідає встановленим вимогам.

Найбільш повно дані про харчову цінність представлені на етикетці ТМ «Олейна традиційна». Більшість олій містять інформацію про вміст жиру та насичених жирних кислот, в той час як ТМ «Олейна традиційна» також наводить дані про вміст мононенасичених і поліненасичених жирних кислот, а також вітаміну Е токоферолу. Інформація про умови та терміни зберігання зазначена на маркуванні всіх зразків. Поряд із цим, термін придатності продукту після відкриття упакування вказано лише на зразках ТМ «Олейна традиційна» та ТМ «Стожар» (не є обов'язковою умовою відповідно до вимог Закону). За результатами аналізу маркування досліджуваних зразків соняшникової олії можна зробити висновок, що воно повністю відповідає встановленим вимогам щодо обов'язкової інформації про харчовий продукт.

Проведена оцінка якості зразків олії на підставі їх органолептичних характеристик дає змогу говорити про повну їх відповідність вимогам, визначеним у Державному стандарті України 4492.

Масова частка вологи та летких речовин чинить значний вплив на стабільність олії - висока кількість зазначених речовин може призвести до розвитку мікрофлори та змін смаку та запаху. Стандарти встановлюють, що для нерафінованої олії цей показник не повинен перевищувати 0,2 %, а для рафінованої - 0,1 %. За результатами дослідження встановлено, що зразки соняшникової олії нерафінованої ТМ «Щедрий дар» і ТМ «Розумний вибір» та рафінованої ТМ «Олейна традиційна» повністю відповідають вимогам ДСТУ. Зразки соняшникової рафінованої олії ТМ «Щедрий дар», ТМ «Своя лінія», ТМ «Чумак», ТМ «Стожар», ТМ «Майола» мають у своєму складі підвищений вміст вологи та летких речовин.

Йодне число вказує на рівень ненасичених жирних кислот у олії. Для якісної соняшникової олії зазначений показник зазвичай перебуває в межах 110-140 г. Йодне число досліджуваних зразків олії знаходиться в допустимих межах. Кислотне та перекисне число досліджуваних олій не перевищують вимоги, встановлені ДСТУ.

Отже, із досліджуваних зразків абсолютно доброякісними виявилися зразок 1 – олія соняшникова запашна нерафінована ТМ «Щедрий дар», зразок 2 – олія соняшникова нерафінована ТМ «Розумний вибір» та зразок 4 – соняшникова рафінована олія дезодорована виморожена марки «П» ТМ «Олейна традиційна». У решті зразків виявлено підвищену кількість вологи та летких речовин, що може сприяти погіршенню якісних показників в процесі зберігання. Результати дослідження можуть бути корисними для споживачів під час вибору якісної соняшникової олії, а також для виробників соняшникової олії для покращення якості своєї продукції.

Список використаних джерел

1. Здорове харчування: ВООЗ оновила рекомендації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://glavcom.ua/country/health/zdorove-kharchuvannja-vooz-onovila-rekomendatsiji-943558.html>.
2. 9 найкорисніших рослинних олій для організму людини [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.visnyk.poltava.ua/news/9-najkorysnishykh-roslynnykh-olij-dlia-orhanizmu-liudyny>.
3. Сирохман, І. В. Проблеми якості і біологічної цінності харчових жирів для дієтичного харчування / І. В. Сирохман, М.-М. В. Калимон // Сучасні аспекти збереження здоров'я людини : зб. праць XI міжнар. міждисцип. наук.-практ. конф. / за ред. проф. Т. М. Ганича. – Ужгород : ДВНЗ «УжНУ», 2018. – С. 177-179.
4. Сирохман, І. В. Проблеми якості і безпечності харчових продуктів / І. В. Сирохман, Т. М. Лозова // Наукові праці НУХТ. – 2011. – № 37. – С. 5-10.
5. Гирич, С. В. Сучасні погляди на споживні переваги та проблеми безпеки рослинних олій / С. В. Гирич, Г. С. Лоянич // Інтелект XXI. – 2018. – № 5. – С. 37-41.
6. Челябієва, В. М. Отримання та оцінка якості харчових жирів підвищеної біологічної цінності / В. М. Челябієва, С. С. Ольшевська // Технічні науки та технології. – 2020. – № 3 (21). – С. 281-285. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3\(21\)-281-285](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-281-285).
7. Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів [Електронний ресурс] : Закон України від 6 грудня 2018 р. № 2639-VIII. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2639-19#n95>.

References

1. Zdorove kharchuvannia: VOOZ onovyla rekomendatsii [Healthy nutrition: WHO updated recommendations]. (2023). <https://glavcom.ua/country/health/zdorove-kharchuvannja-vooz-onovila-rekomendatsiji-943558.html>.
2. 9 najkorysnishykh roslynnykh olii dlia orhanizmu liudyny [9 most useful vegetable oils for the human body]. (2020). <https://www.visnyk.poltava.ua/news/9-najkorysnishykh-roslynnykh-olij-dlia-orhanizmu-liudyny>.
3. Syrokhman, I.V., Kalimon, M.-M.B. (2018). Problemy yakosti i biolohichnoi tsinnosti kharchovykh zhyriv dlia diietychnoho kharchuvannia [Problems of the quality and biological value of dietary fats for dietary nutrition]. *Suchasni aspekty zberezhenia zdo-rovia liudyny: zb. prats KhI mizhnar. mizhdystsyp. nauk.-prakt. konf. – Modern aspects of preserving human health: Proceedings of the 11th international interdisciplinary scientific and practical conference* (pp. 177-179). DVNZ "UzhNU".
4. Syrokhman, I.V., & Lozova, T.M. (2011). Problemy yakosti i bezpechnosti kharchovykh produktiv [Problems of quality and safety of food products]. *Naukovi pratsi NUKhT – Scientific works of the National Technical University of Ukraine*, 37, 5-10.
5. Hyrych, S.V., & Loyanich, G.S. (2018). Suchasni pohliady na spozhyvni perevahy ta problemy bezpeky roslynnykh olii [Current perspectives on the consumer benefits and safety issues of vegetable oils]. *Intelekt XXI – Intelligence XXI*, (5), 37-41.
6. Chelyabieva, V.M., & Olshevska, S.S. (2020). Otrymannia ta otsinka yakosti kharchovykh zhyriv pidvyshchenoi biolohichnoi tsinnosti [Obtaining and evaluating the quality of edible fats of increased biological value]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, 3(21), 281–285. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3\(21\)-281-285](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-281-285).
7. Law of Ukraine "On information for consumers regarding food products". (2023). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2639-19#n95>.

Отримано 22.02.2024

UDC 665.347.8

Tetiana Denysenko¹, Kristina Koval², Viktoriia Napalko³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Entrepreneurship and Trade
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: tanjadeni@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7022-5884>

ResearcherID: [G-6003-2014](https://orcid.org/0000-0002-7022-5884). **ScopusID:** [57210359056](https://orcid.org/0000-0002-7022-5884)

²PhD, lecturer of Department of entrepreneurship and trade

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kristy80kv@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3796-6653>

ResearcherID: [AAI-2121-2019](https://orcid.org/0000-0003-3796-6653)

³student of the group PT-221

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: napalkoviktorija@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-3428-429X>

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF SUNFLOWER OIL

Comparative assessment enables consumers to make an informed choice and use high-quality and safe sunflower oil, which has a positive effect on their health and economic well-being. Vegetable oils, especially sunflower, are a popular source of dietary fat in economically developed countries, promoting heart and brain health. They contain essential fatty acids useful for cell growth and brain development. Sunflower oil is also the most widespread type of vegetable oil in Ukraine. A healthy lifestyle requires quality food. The issue of assessing the quality of sunflower oil is timely and relevant. The purpose of our research was to assess the quality of sunflower oil samples of leading producers in accordance with the requirements of current regulatory documentation and the declared labeling.

Based on the survey, it was determined which types of sunflower oil are preferred by consumers. These samples were chosen as research objects. At the first stage of the research, the appearance of the package and the quality of the information provided on the label were evaluated. Then the quality of the samples was assessed according to organoleptic and physicochemical parameters.

The assessment of the labeling and quality of sunflower oil showed that the information on the labels meets the requirements for mandatory information about the food product. The organoleptic characteristics of the oil samples meet the requirements of the State Standard of Ukraine 4492 "Sunflower oil. Specifications".

Some samples have an increased moisture and volatile content, which can affect the stability and quality of the product during storage. However, the iodine value of all samples is within acceptable limits. Acid and peroxide numbers also do not exceed the established norms. The results of the research can be useful both for consumers when choosing high-quality oil, and for producers in order to improve product quality.

Key words: sunflower oil; labeling; quality; organoleptic assessment; physical and chemical parameters.

Fig.: 1. **Table:** 3. **References:** 8.

Сергій Зайцев

кандидат технічних наук, інженер кафедри атомних електростанцій
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)
E-mail: sdjavdet@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОЛИВ ПІД ВПЛИВОМ АКУСТИЧНОЇ КАВІТАЦІЇ**

Стаття є публікацією науково-методичного характеру. У роботі розглянуто результати удосконалення методу визначення деградації енергетичних олив під впливом акустичної кавітації. Метою дослідження є підвищення надійності результатів визначення впливу акустичної (ультразвукової) кавітації на деградацію енергетичних олив. Предмети досліджень: турбінні оливи «Азмол Тп-22с», «Агріол Тп-22», «Тп-30», «Reolube®OMTI» (на основі трикселенілфосфатів), компресорна олива «ХФ-12-16». В роботі удосконалено принципову схему установки для дослідження впливу акустичної (ультразвукової) кавітації на деградацію енергетичних олив, що дозволяє виконувати дослідження при потужності ультразвукового випромінювача 20 Вт з частотами до 125 кГц. Під час дослідження вмісту повітря (або водню) в турбінних оливах під впливом на них ультразвукової кавітації у присутності повітря (або водню) над поверхнями цих турбінних олив, показано, що при температурі 20 °С ці турбінні оливи містять у собі повітря (або водень) у вигляді емульсії із загальним вмістом відповідного газу (повітря або водню) не більше ніж 15 % об'ємних. Під час дослідження впливу ультразвукової кавітації на деградацію енергетичних олив встановлено, що під впливом ультразвукової кавітації в енергетичних оливах: генеруються та розчиняються в них газу C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 ; генеруються тверді частки вуглецю; вміст присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157» знижується. Встановлено наявність H_2S або SO_2 в газових потоках над мінеральними турбінними оливами, та наявність PH_3 в газових потоках над синтетичною вогнестійкою турбінною оливою (на основі трикселенілфосфатів) під впливом на ці турбінні оливи ультразвукової кавітації. Для досліджених енергетичних олив в інтервалі температур 10–100 °С: підвищення температури призводить до зниження значень кінематичної в'язкості; ультразвукове опромінювання призводить до зниження значень кінематичної в'язкості.

Ключові слова: енергетичні оливи; мінеральні турбінні оливи; синтетична вогнестійка турбінна олива; мінеральна компресорна олива; газова хроматографія; розчинені газу; акустична кавітація; присадки в енергетичних оливах; кінематична в'язкість.

Табл.: 2. Рис.: 3. Бібл.: 25.

Актуальність теми дослідження. Стаття є публікацією науково-методичного характеру. В обладнанні атомних електростанцій (АЕС) широко застосовують енергетичні оливи (ЕО), які забезпечують надійну експлуатацію оливонаповненого енергетичного обладнання [1; 2]. У тепломеханічному обладнанні енергоблоків АЕС України використовують мінеральні або синтетичні вогнестійкі турбінні оливи [3]. Мінеральні компресорні оливи застосовують у холодильних машинах, наприклад, для осушення циркуляційного потоку водню під час його охолодження в системі водневого охолодження турбогенераторів [4]. ЕО для відповідного оливонаповненого тепломеханічного обладнання постійно удосконалюються [3]. Під час експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні у процесі дії вібрації на це обладнання, ЕО підлягають безперервній деградації за рахунок виникнення акустичної кавітації в цих оливах з утворенням в них розчинених газів CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , H_2 , CO , CO_2 [5]. Таким чином, є необхідність у виконанні досліджень, які спрямовані на розвиток та удосконалення методів визначення характеру деградації ЕО під впливом акустичної, у тому числі ультразвукової (УЗ), кавітації [5; 6]. Це може дозволити застосувати існуючі або розробити нові діагностичні моделі для діагностування оливонаповненого обладнання АЕС, наприклад, за результатами контролю в ЕО вмісту розчинених газів або присадок та швидкості змінювання їх концентрацій [7; 8].

Постановка проблеми. Вібрації у вузлах оливонаповненого обладнання призводять до виникнення в них акустичних коливань, які у свою чергу можуть бути джерелом акустичної кавітації в ЕО, що циркулюють в цих вузлах. Основними видами оливонаповненого обладнання в структурі АЕС є: електродвигуни головних циркуляційних насосів ядерного реактора та оливонасоси цих електродвигунів; системи циркуляційного оливопостачання турбогенераторів (ТГ) з оливонасосами; оливонасоси системи змащення резервної дизель-електричної станції АЕС; оливонасоси системи продувки-підживлення

першого контуру АЕС; оливонасоси низькотемпературних повітророзподільних установок у складі устаткування АЕС; установки для термічного та термовакuumного оброблення енергетичних олив; компресори холодильних установок. Таким чином є необхідність у постійному удосконаленні методів визначення впливу акустичної кавітації на деградацію ЕО, в тому числі турбінних та компресорних олив, для подальшого діагностування стану цих ЕО. Це дозволить розробити технічні заходи для недопущення такої деградації або для зниження її впливу на якість ЕО у процесі їх експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні АЕС, та підвищити надійність, наприклад, ТГ із водневим або повітряним охолодженням, або компресорів [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [5] наведено результати досліджень та розрахунків значень густини ρ та кінематичної в'язкості ν для мінеральної турбінної оливи «Азмол Тп-22с» в інтервалі температур 10–90 °С. Аналогічні результати досліджень для синтетичної вогнестійкої турбінної оливи «Reolube® ОМТІ» (на основі трикселенілфосфатів), відсутні.

У роботі [3] наведено результати досліджень впливу електричних розрядів на деградацію сучасних мінеральної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» та синтетичної вогнестійкої турбінної оливи «Fytquel®L» залежно від вмісту в них води та утворюванням в них розчинених газів C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , H_2S , SO_2 , PH_3 . При цьому під час таких електричних розрядів у турбінних оливах виникають акустичні коливання, що може призвести виникнення акустичної кавітації в цих оливах та додатково впливати на їх деградацію [5].

У роботі [9] викладено метод визначення нормованої УЗ газостійкості ізоляційних рідин для визначення порівняльної стійкості ізоляційних рідин до газоутворення під дією енергії УЗ поля. При цьому під час виконання розрахунків як генеровані розчинених компоненти в ізоляційних рідинах здебільшого використовують C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , C_3H_6 , C_3H_8 , H_2 , CO , CO_2 , O_2 , N_2 , концентрації яких визначають за методами газової хроматографії (ГХ) [10; 11].

У роботі [12] викладено методику визначення вмісту присадок «Іонол», «В-15/4», «Д-157» в ЕО методом високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ).

В роботі [4] наведено газову схему водневого охолодження турбогенераторів, технологічну схему оливопостачання ущільнень валу кільцевого типу турбогенераторів єдиної серії потужністю 60–300 МВт та конструктивні схеми найбільш поширених ущільнень валу турбінною оливою, в яких можливий розвиток вібрацій та виникнення кавітації в турбінних оливах.

У роботі [13] наведено методику визначення стабільності кінематичної в'язкості (відносного зниження кінематичної в'язкості) після опромінення мінеральної оливи АМГ-10 з використанням УЗ установки протягом 50 хвилин. Ця олива призначена як робоча рідина для гідравлічних пристроїв. Метод застосовується для умовної оцінки схильності цієї оливи до зниження кінематичної в'язкості за рахунок механічного руйнування (деструкції) полімерних присадок в умовах експлуатації. Сутність методу полягає у визначенні відносного зниження кінематичної в'язкості оливи після опромінення її за заданих умов на УЗ установці. Імовірно, цей метод може бути також застосовано до визначення стабільності кінематичної в'язкості після опромінення мінеральних і вогнестійких синтетичних турбінних олив (на основі трикселенілфосфатів) з використанням УЗ установки.

У роботах [14; 15] наведено, що мінеральні турбінні оливи використовують як інформаційне середовище, у якому присутність діагностичних компонентів (вода; присадка «Іонол»; механічні домішки) характеризує наявність в обладнанні дефектів в зонах поверхонь тертя під впливом точкової дії високих температур, вібрації, електричних струмів, водневого зношування. При цьому застосовано вже існуючі діагностичні моделі [8; 16].

У роботі [17] наведено результати експериментального та розрахункового дослідження впливу домішок наночастинок Al_2O_3 на значення в'язкості, тиску насичених парів, поверхневого натягу розчинів холодоагенту «R600a – мінеральна олива». Вперше для опису отриманих експериментальних даних та прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів в широкому інтервалі параметрів стану була застосована модель «SP-QSPR (Scaling Principles - Quantitative Structure-Property Relationship)». Показано, що домішки наночастинок у розчинах «холодильний агент – мінеральна олива» сприяють збільшенню в'язкості й тиску насичених парів, зменшенню поверхневого натягу. Зазначені ефекти повинні враховуватися при оцінці перспективності застосування нанотехнологій в холодильному обладнанні. Можна очікувати, що отримані результати можна застосувати під час експлуатації турбінних олиव.

Наведена інформація в літературних джерелах [1–17] вказує на неповноту відомостей про вплив акустичної кавітації на деградацію мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив. Усе це вимагає проведення відповідних досліджень із залученням сучасних мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив, що знаходяться в експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні АЕС в Україні.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявності вже відомих результатів досліджень впливу акустичної кавітації на деградацію ЕО, удосконалення методів визначення впливу акустичної кавітації на деградацію сучасних мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив є необхідністю для діагностування стану цих ЕО та розробки заходів для недопущення такої деградації або зниження її впливу на якість ЕО в процесі їх експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні АЕС.

Мета статті. Головною метою статті є підвищення надійності результатів визначення впливу акустичної кавітації на деградацію мінеральних ЕО та вогнестійких синтетичних турбінних олив на основі трикселенілфосфатів.

Завдання дослідження: 1) удосконалення принципової схеми установки для дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО; 2) дослідження: а) генерування розчинених газів C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 та твердих часток вуглецю в турбінних оливах та в мінеральній компресорній оливі для холодильних машин під впливом на них УЗ кавітації; б) вмісту повітря (або водню) в турбінних оливах під впливом на них УЗ кавітації у присутності повітря (або водню) над поверхнями цих турбінних олив; в) характеру деградації присадок у мінеральних ЕО під впливом на них УЗ кавітації; г) наявності H_2S або SO_2 в газових потоках над мінеральними турбінними оливами під впливом на них УЗ кавітації, та наявності PH_3 в газових потоках над вогнестійкою синтетичною турбінною оливою (на основі трикселенілфосфатів) під впливом на неї УЗ кавітації; д) значень кінематичної в'язкості для ЕО в інтервалі температур 10–100 °С під впливом на них УЗ кавітації.

Виклад основного матеріалу. Об'єкти досліджень: методи визначення впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО при потужності УЗ випромінювача 20 Вт з частотами до 125 кГц. Предмети досліджень: а) мінеральні турбінні оливи «Азмол Тп-22с», «Агрінол Тп-22» та «Тп-30», вогнестійка синтетична турбінна олива «Reolube® ОМТІ» (на основі трикселенілфосфатів), що містять у собі розчинені гази C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , та розчинену або вільну (емульсійну) воду; б) мінеральна компресорна олива «ХФ-12-16» для холодильних машин, що містить у собі: антиокислювальну присадку «Іонол»; розчинені гази C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , та тверді частки мідного порошку марки ПМС-Н за його вмістом 0,5 % маси та розмірами часток менше, ніж 224 мкм [18]; в) суміші присадок в мінеральних енергетичних оливах: «Іонол» (антиокислювальна присадка), «В-15/41» (антиржавійна присадка), «Д-157» (деемульгуюча присадка); г) потоки водню або повітря, що містять в собі гази C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , H_2S , PH_3 , SO_2 , та знаходяться над поверхнею відповідної турбінної оливи.

При виконанні досліджень було використано:

1. Засоби вимірювальної техніки: а) газовий хроматограф «Кристал-2000М» для визначення вмісту розчинених газів C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 в турбінних оливах [10; 11], та присадки «Іонол» в мінеральних ЕО [19]; б) індикаторні трубки типу «SPH-1L» (діапазон вимірювань 0,05–2,5 ppm для PH_3) – для визначення вмісту PH_3 в газових потоках [20], та «Dräger-Tube» (діапазон вимірювань: 0,2–5 ppm для H_2S та 0,1–3 ppm для SO_2) – для визначення вмісту H_2S та SO_2 в газових потоках [21] (до опромінювання турбінних олив УЗ коливаннями, газу H_2S , SO_2 , PH_3 у газових фазах над поверхнею цих турбінних олив відсутні); в) рідинний мікроколоночний хроматограф «Міліхром» для визначення вмісту присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157» в мінеральних ЕО [22]; г) удосконалену установку для визначення кінематичної в'язкості ν [6] ЕО за вимогами [23]; д) кулонометричний титратор «DL-32» – для визначення вмісту води у відповідних ЕО за методом К. Фішера [24]; е) пристрій для прискорення досягнення рівноваги з обертовим барабаном для розміщення в ньому шприців об'ємами до 50 см^3 з аналізованими пробами ЕО і газоподібними екстрагентами для встановлення фазових рівноваг у системах «ЕО – екстрагент (газоподібний аргон (Ar))» [5]; є) градуйовані газоподібні суміші H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO , CO_2 в газоподібному Аг.

2. Методи: а) ГХ – для визначення вмісту розчинених газів C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 [10; 11] та присадки «Іонол» [19] у відповідних ЕО; б) ВЕРХ – для визначення вмісту присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157» в мінеральних ЕО [12; 22]; в) кулонометричного титрування – для визначення вмісту води у відповідних ЕО за методом К. Фішера [24]; г) колориметричного визначення вмісту PH_3 , H_2S , SO_2 в газових потоках із застосуванням відповідних індикаторних трубок [20; 21]; д) визначення кінематичної в'язкості рідких нафтопродуктів, прозорих і непрозорих рідин вимірюванням часу витікання певного об'єму рідини під дією сили тяжіння через калібрований скляний капілярний віскозиметр [23].

При визначенні вмісту розчинених газів в енергетичних оливах використано: статичний варіант методу ГХ вимірювань із застосуванням газоподібного екстрагента і відповідних варіантів методик аналізів рівноважної газової фази в системах «ЕО – розчинений компонент – газоподібний екстракт»; метод абсолютного градуювання при визначенні вмісту компонентів в газоподібних екстрактах з використанням відповідних газоподібних градуювальних сумішей [10; 11]. Умови виконання ГХ досліджень під час визначення вмісту розчинених газів в ЕО відповідають вимогам [10; 11]. При дослідженні вмісту PH_3 , H_2S , SO_2 в газових потоках під впливом УЗ кавітації на відповідні турбінні оливи, застосовано пристрій для приготування ізоляційної оливи, що насичена відповідним розчиненим газом за методикою [10]. УЗ опромінювання ЕО виконано у продовж 50 хвилин. Початковий вміст компонентів в ЕО не перевищував значення: 0,03 % маси – для води [2]; порогів визначення – для розчинених газів [10]. Наявність твердих часток вуглецю в ЕО визначено за методикою [12]. Початковий вміст присадок в ЕО мав значення: а) «Іонол» – 0,5 % маси, «В-15/4» – 0,02 % маси, «Д-157» – 0,02 % маси, «Дф-11» – 0,52 % маси (для «Тп-30»); б) «Іонол» – 0,8 % маси, «В-15/4» – 0,02 % маси, «Д-157» – 0,02 % маси (для «Азмол Тп-22с» та «Агрінол Тп-22»); в) «Іонол» – 0,3 % маси (для «ХФ-12-16»). Вимірювання вмісту газів в ЕО виконано при температурі $t_i = (20 \pm 0,5)^\circ C$. Тривалість газової екстракції компонентів з ЕО – не менше, ніж 1 година.

На рис. 1 показано удосконалену принципову схему установки для дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО [5].

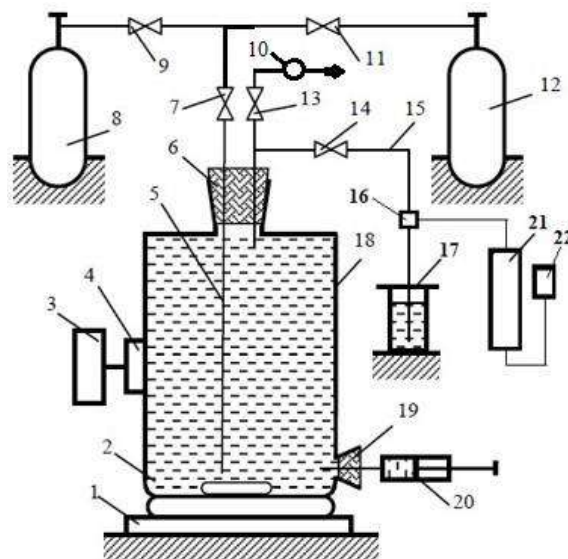


Рис. 1. Удосконалена принципова схема установки для дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО:

1 – магніт; 2 – магнітна мішалка; 3 – УЗ генератор; 4 – УЗ випромінювач; 5, 15 – газові трубопроводи; 6 – кришка; 7, 9, 11, 13, 14 – крани; 8 – газовий балон з воднем; 12 – газовий балон з повітрям; 10 – вакуумний насос; 16 – перемикач газових потоків; 17 – рідинний затвор; 18 – посудина з ЕО; 19 – вузол введення та відбору ЕО; 20 – шприц; 21 – індикаторна трубка (або газовий кран-дозатор газового хроматографа); 22 – ротаметр
Джерело: розроблено автором.

Установка (рис. 1) працює таким чином: 1) за допомогою вакуумметра поз. 10 вакуумують посудину поз.18 до залишкового тиску не більше 0,1 мм рт. ст.; 2) заповнюють посудину поз.18 дегазованою ЕО на 90 % від об'єму посудини поз.18; 3) за допомогою шприца поз. 20 відбирають пробу ЕО для визначення в ній вмісту: розчинених газів C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , N_2 , O_2 , PH_3 , H_2S , SO_2 ; води; присадок; твердих частинок вуглецю; 4) пропускають через ЕО потік водню з використанням газового балона поз. 8 або потік повітря з використанням балона поз. 12; 5) за допомогою відповідних індикаторних трубок поз. 21 визначають у газовому потоці водню (або повітря) вміст у ньому газів PH_3 , H_2S , SO_2 ; 6) за допомогою газового хроматографа (з використанням перемикача газових потоків поз. 16 визначають у газовому потоці водню (або повітря) вміст у ньому газів C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , N_2 , O_2 ; 7) за допомогою УЗ генератора та УЗ випромінювача піддають УЗ опромінюванню ЕО в посудині поз.18 протягом 50 хвилин; 8) після закінчення УЗ опромінювання: а) відбирають пробу ЕО для визначення в ній вмісту C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , N_2 , O_2 ; води; присадок; твердих часток вуглецю; б) пропускають через опромінену ЕО потік водню з використанням газового балона поз. 8 або потік повітря з використанням балона поз. 12, і визначають у потоці відповідного газу (водню або повітря) присутність у ньому газів PH_3 , H_2S , SO_2 (за допомогою відповідних індикаторних трубок поз. 21), або газів C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , N_2 , O_2 (за допомогою газового хроматографа).

У табл. 1 наведено результати дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО.

З табл. 1 випливає, що при дослідженні впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО, у цих оливах: генеруються та розчиняються гази C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 ; вміст присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157».

Таблиця 1 – Результати дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО

ЕО	Вміст розчинених газів, ppm							Вміст присадки, % маси		
	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	«Іонол»	«В-15/4»	«Д-157»
Компресорна олива «ХФ-12-16» для холодильних машин										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	0,3	відс	відс
2	0,15	1,3	0,1	0,6	1,0	0,1	0,03	0,1	відс	відс
Турбінна олива «Азмол Тп-22с»										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	0,8	0,02	0,02
2	0,1	1,2	0,08	0,6	1,0	0,08	0,03	0,4	< 0,01	< 0,01
Турбінна олива «Агрінол Тп-22»										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	0,8	0,02	0,02
2	0,09	1,1	0,09	0,5	1,1	0,1	0,05	0,3	< 0,01	< 0,01
Турбінна олива «Тп-30»										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	0,5	0,02	0,02
2	0,3	1,7	0,2	0,8	0,9	0,2	0,05	0,2	< 0,01	< 0,01
Турбінна олива «Reolube®OMTI»										
1	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	< пв	відс	відс	відс
2	0,2	1,3	0,1	0,7	1,1	0,11	0,08	відс	відс	відс

Примітки: ЕО – енергетична олива; 1 та 2 – енергетична олива до та після УС опромінювання, відповідно; пв – поріг визначення, ppm; відс – відсутність даних.

Джерело: розроблено автором.

На рис. 2 показано наявність твердих часток вуглецю на фільтрі після фільтрації турбінної оливи «Тп-30» після закінчення впливу на неї УЗ кавітації.



Рис. 2. Наявність твердих часток вуглецю на фільтрі після фільтрації турбінної оливи «Тп-30» після закінчення впливу на неї УЗ кавітації
Джерело: розроблено автором.

Аналогічні результати (по наявності твердих часток вуглецю) отримано після визначення впливу УЗ кавітації на інші досліджені ЕО.

При дослідженні вмісту повітря (або водню) за методом ГХ [10; 11] у турбінних оливах під впливом на них УЗ кавітації у присутності повітря (або водню) над поверхнями цих турбінних оливи, показано, що при температурі 20 °С ці турбінні оливи містять у собі повітря (або водень) у вигляді емульсії із загальним вмістом відповідного газу (повітря або водню) не більше, ніж 15 % об'ємних. При цьому, наприклад для турбінної оливи «Тп-30» при температурі 20 °С досліджено, що розчинність повітря не перевищує 11 % об'ємних, а розчинність водню не перевищує 5,2 % об'ємних [25].

При дослідженні наявності H₂S, SO₂, PH₃ в газових потоках над турбінними оливами під впливом на них УЗ кавітації, встановлено, що: а) концентрація SO₂ у повітрі над поверхнею турбінної оливи «Азмол Тп-22с» має значення 1,3 ppm. Вплив УЗ кавітації на мінеральні турбінні оливи «Агрінол Тп-22» та «Тп-30» має аналогічний характер: у повітрі накопичується SO₂, що утворюється із цих турбінних оливи, та переходить у газову фазу (у повітря) над ними; б) концентрація H₂S у водні над поверхнею турбінної оливи «Азмол Тп-22с» має значення 2.3 ppm. Вплив УЗ кавітації на мінеральні турбінні оливи «Агрінол Тп-

22» та «Тп-30» має аналогічний характер: у водні накопичується H_2S , що утворюється із цих турбінних оливок, та переходить у газову фазу (водень) над ними; в) концентрація PH_3 у водні над поверхнею турбінної оливи «Reolube®ОМТІ» має значення 1,5 ppm: PH_3 утворюється з цієї турбінної оливи та переходить у газову фазу (водень) над нею.

У табл. 2 наведено результати дослідження значень кінематичної в'язкості ν для ЕО в інтервалі температур 10–100 °С під впливом на них УЗ кавітації.

Таблиця 2 – Результати дослідження значень кінематичної в'язкості для ЕО в інтервалі температур 10–100 °С під впливом на них УЗ кавітації

ЕО	10 °С	15 °С	20 °С	30 °С	40 °С	50 °С	60 °С	70 °С	80 °С	100 °С
	Кінематична в'язкість, мм ² /с									
Компресорна олива «ХФ-12-16 для холодильних машин»										
1	155	105	78	43	27	18	13	10	7	5
2	93	63	47	26	16	11	7,8	6	4,2	3
Турбінна олива «Азмол Тп-22с»										
1	150	130	100	56	33	21	15	10	8	5,8
2	75	65	50	28	16	11	8	6	4	3
Турбінна олива «Агрінол Тп-22»										
1	210	150	100	54	32	22	14	10	7,9	6
2	105	75	50	27	16	11	7	5,5	4	3
Турбінна олива «Тп-30»										
1	340	230	160	85	48	30	21	15	11	6
2	220	150	104	55	31	20	13,7	10	7,2	3,9
Турбінна олива «Reolube®ОМТІ»										
1	155	110	74	42	25	17	11	8	6	4,4
2	101	72	48	27	16	11	7	5	3,9	2,9

Примітки: ЕО – енергетична олива; 1 та 2 – енергетична олива до та після УЗ опромінювання, відповідно

Джерело: розроблено автором.

На рис. 3 як приклад у графічній формі показано характер залежності кінематичної в'язкості ν від температури t для турбінної оливи «Reolube®ОМТІ».

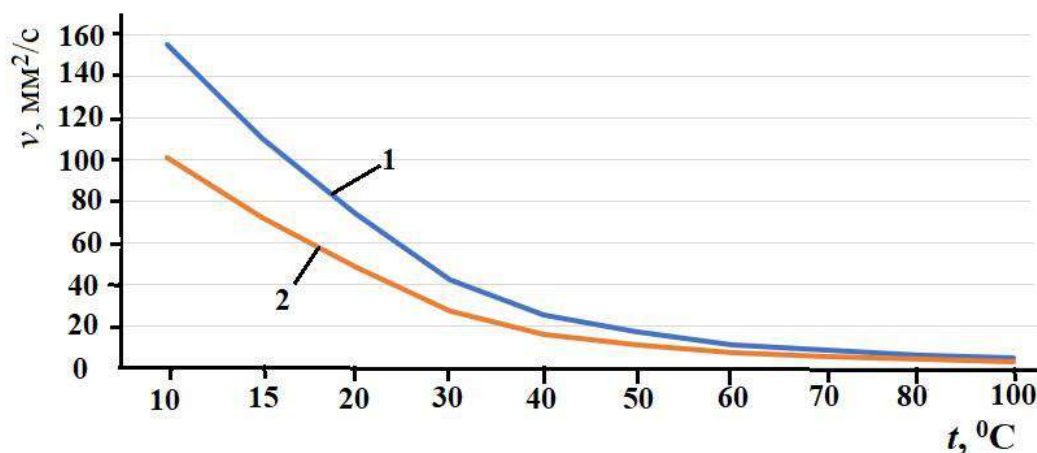


Рис. 3. Залежність значень кінематичної в'язкості ν від температури t для турбінної оливи «Reolube®ОМТІ»: ν – кінематична в'язкість; t – температура, °С; 1 – турбінна олива до УЗ опромінювання; 2 – турбінна олива після УЗ опромінювання

Джерело: розроблено автором.

З табл. 2 та рис. 3 випливає, що для досліджених ЕО в інтервалі температур 10 – 100 °С: підвищення температури призводить до зниження значень кінематичної в'язкості; УЗ опромінювання призводить до зниження значень кінематичної в'язкості. Аналогічний характер залежності $\nu = f(t)$ виявлено і для інших досліджених ЕО.

Результати дослідження показали, що якісний склад генерованих газів (C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , H_2S , SO_2 , PH_3) у відповідних ЕО під впливом на них акустичної кавітації відповідає якісному складу генерованих газів в аналогічних ЕО під впливом на них імпульсного електричного струму високої напруги [4].

Отримані результати дають змогу для подальшого визначення, наприклад, характеру деградації деемульгуючих, деактивууючих, протизношувальних, протипінних, комбінованих присадок та інгібіторів окиснення і корозії в турбінних оливах під впливом на них акустичної кавітації у вузлах підшипників турбогенераторів потужністю до 1200 МВт із водневим охолодженням, що оснащені системами циркуляції турбінних олив, для діагностування стану цих турбінних олив та розробки заходів для недопущення такої деградації або зниження її впливу на якість турбінних олив у процесі їх експлуатації та на надійність турбогенераторів.

Висновки. 1. Удосконалено принципову схему установки для дослідження впливу УЗ кавітації на деградацію ЕО дозволяє виконувати дослідження при потужності УЗ випромінювача 20 Вт з частотами до 125 кГц. 2. При дослідженні вмісту повітря (або водню) в турбінних оливах під впливом на них УЗ кавітації у присутності повітря (або водню) над поверхнями цих турбінних олив, показано, що при температурі 20 °С ці турбінні оливи містять в собі повітря (або водень) у вигляді емульсії із загальним вмістом відповідного газу (повітря або водню) не більше, ніж 15 % об'ємних. 3. Під впливом УЗ кавітації в ЕО: генеруються та розчиняються в них газу C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 ; генеруються тверді частки вуглецю; вміст присадок «Іонол», «В-15/41», «Д-157» знижується. 4. Встановлено наявність H_2S або SO_2 в газових потоках над мінеральними турбінними оливами, та наявність PH_3 в газових потоках над вогнестійкою синтетичною турбінною оливою (на основі трикселенілфосфатів) під впливом на ці турбінні оливи УЗ кавітації. 5. Для досліджених ЕО в інтервалі температур 10–100 °С: підвищення температури призводить до зниження значень кінематичної в'язкості; УЗ опромінювання призводить до зниження значень кінематичної в'язкості. 6. Отримані результати можуть бути застосовані для подальшого розвитку методів дослідження впливу акустичної кавітації на деградацію ЕО, у тому числі для визначення акустичної газостійкості ізоляційних рідин.

Список використаних джерел

1. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2003. – 598 с.
2. СОУ НАЕК 085:2020. Турбінні оливи для енергетичного обладнання АЕС. Правила експлуатації. – Київ : НАЕК «Енергоатом», 2020. – 53 с.
3. Зайцев, С. Удосконалення методів визначення впливу електричних розрядів на деградацію турбінних олив / С. Зайцев // Технічні науки та технології. – 2023. – № 4(34). – С. 147-162. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-147-162
4. Посібник з вивчення Правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Електротехнічне устаткування електричних станцій та мереж, оперативно-диспетчерське керування / О. Г. Баженов, В. О. Бойко, В. М. Браєрський, О. П. Васьковський. – Київ : ДП НТУКЦ «Аселенерго», 2004. – 800 с.
5. Современные методы контроля энергетических масел и продуктов их деградации для обеспечения надежности эксплуатации маслonaполненного электрооборудования электрических станций и сетей / С. В. Зайцев, В. А. Кишневский, Г. А. Оборский, И. В. Прокопович. – Одесса : Экология, 2019. – 304 с.
6. Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant / P. Kuznietsov, A. Tykhomyrov, O. Biedunkova, S. Zaitsev // Scientific Horizon. – 2022. – Vol. 25, № 12. – P. 69-79. DOI :10.48077/scihor.25(12).2022.69-79.
7. Жаров, А. П. Предупреждение аварий подшипников паровых турбин / А. П. Жаров. – Москва : Энергия, 1974. – 112 с.

8. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 99 с.
9. Анпилогов, Н. Г. Методы контроля состояния и диагностирования силовых трансформаторов классом напряжения 35 кВ и выше / Н. Г. Анпилогов, Я. С. Бедерак. – Харьков : Форт, 2010. – 408 с.
10. СОУ-Н ЕЕ 46.302:2006. Підготовка та проведення хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі маслonaповненого електрообладнання : метод. вказівки. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 70 с.
11. IEC 60567:1992-07. Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases. – Geneva : Switzerland, 2005. – 80 p.
12. СОУ ВЕА. 100.1/01:2015. Енергетичні оливи та оливні господарства підприємств енергетичної галузі України, та підприємств, де застосовується аналогічне обладнання. Організація експлуатації та технічного обслуговування. Норми та вимоги. – Київ : Стандарт «ВЕА», 2015. – 216 с.
13. ДСТУ ГОСТ 6794:2019. Олива АМГ-10. Технічні умови. – [Чинний з 10.06.2019]. – Київ : ДДП «УкрНДНЦ», Державний стандарт України, 2019. – 8 с.
14. Зайцев, С. В. Діагностування енергетичної оливи в системах охолодження насосних агрегатів обладнання електростанцій / С. В. Зайцев, В. М. Тихенко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2023. – № 2(1/319). – С. 113-119. DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-113-119
15. Balitskii, O. A. Hydrogen effect on the high-nickel surface steel properties during machining and wear with lubricants / O. A. Balitskii, V. O. Kolesnikov, A. I. Balitskii, J. J. Elias, M. R. Havrylyuk // Archives of Materials Science and Engineering. – 2020. – № 104(2). – P. 49-57. DOI: 10.5604/01.3001.0014.4894.
16. IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104 -2008). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. – Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society / The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue. – New York, NY 10016-5997, 2019. – 98 p.
17. Экспериментальное и расчетное исследование влияния наночастиц Al_2O_3 на теплофизические свойства растворов хладагента R600a с компрессорным маслом / В. П. Железный, Н. Н. Лукьянов, О. Я. Хлиева, А. С. Никулина // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – Т. 51, Вип. 4. – С. 82-91. DOI: 10.15673/0453-8307.4/2015.44780
18. ДСТУ ГОСТ 4960:2019 Порошок мідний електролітичний. Технічні умови. – [Чинний з 02.08.2019]. – Київ : ДДП «УкрНДНЦ», Державний стандарт України, 2019. – 18 с.
19. СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. – Київ : КВІЦ: Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 170 с.
20. Трубки індикаторні SPH-1L (для фосфіну) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://greencold.com.ua/index.php/tovary/trubki-indikatornye-sph-1l>.
21. Справочник по индикаторным трубкам и CMS чипам компании Dräger. Анализ почвы, воды и воздуха, а также технических газов [Електронний ресурс]. – Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2015. – 458 p. – Режим доступу: https://www.kpo-elektro.ru/files/Air-flow_tester.
22. IEC 60666:2010. Detection and determination of specified additives in mineral insulating oils. Geneva, Switzerland : International Standard. – 64 p.
23. ISO 3104:2020. Petroleum products – Transparent and opaque liquids – Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity. – Standard by International Organization for Standardization, 2020. – 32 p.
24. IEC 60814:1997. Insulating liquids – Oil-impregnated paper and pressboard – Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration Paperback – Distributed through American National Standards Institute (ANSI) (August 19, 2007). – Geneva : Switzerland, 2005. – 54 p.
25. Zaitsev, S. Improving methods for monitoring bearing units of electric motors in reverse water supply systems of nuclear power plants / S. Zaitsev, V. Tikhenko // Proceedings of Odessa Polytechnic University. – 2023. – Is. 1(67). – P. 96-105. DOI: 10.1527/opu.1.67.2023.12.

References

1. НКД 34.20.507-2003. Tekhnichna ekspluatatsiia elektrychnykh stantsii i merezh. Pravyla "GRIFRE" [Technical operation of power plants and networks. Rules. (GCD 34.20.507-2003)]. (2003). GKD 34.20.507-2003.

2. NAEK "Energoatom". (2020). SOU NAEK 085:2020. Turbynni olyvy dlia enerhetychnoho obladnannia AES. Pravyla ekspluatatsii [Turbine oils for NPP power equipment. Operating rules. (SOU NAEK 085:2020)].
3. Zaitsev, S. (2023). Udoskonalennia metodiv vyznachennia vplyvu elektrychnykh rozriadiv na dehradatsiiu turbinykh olyv [Improvement of methods for determining the effect of electrical discharges on the degradation of turbine oils]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 4(34), 147–162. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-147-162.
4. Bazhenov, O.G., Boyko, V.O., Briersky, V.M., Vaskovskyi, O.P. (2004). *Posibnyk z vyvchennia Pravyl tekhnichnoi ekspluatatsii elektrychnykh stantsii i merezh. Elek-trotekhnichne ustatkuvannia elektrychnykh stantsii ta merezh, operatyvno-dyspetcherske keruvannia [Study guide for the Rules of Technical Operation of Power Plants and Networks. Electrical equipment of power plants and networks, operational and dispatch control]*. SE NTUCC "Aselenergo".
5. Zaitsev, S.V., Kishnevsky, V.A., Oborsky, G.A., & Prokopovich, I.V. (2019). *Sovremennye metody kontroliia energeticheskikh masel i produktov ykh dehradatsii dlia obespecheniia nadezhnosti ekspluatatsii maslonapolnennogo elektrooborudovanyia elektrycheskykh stantsyi y setei [Modern methods for monitoring energy oils and their degradation products to ensure the reliability of operation of oil-filled electrical equipment of power plants and networks]*. Ecology.
6. Kuznietsov, P., Tykhomyrov, A., Biedunkova, O, Zaitsev, S. (2022). Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant. *Scientific Horizon*, 25(12), 69–79. DOI:10.48077/scihor.25(12).2022.69-79.
7. Zharov, A.P. (1974). *Preduprezhdenie avarii podshipnikov parovykh turbin [Prevention of accidents of steam turbine bearings]*. Energia.
8. "GRIFRE". (2007). Diahnostyka maslonapovnenoho transformatornoho obladnannia za rezultatamy khromatohrafichnoho analizu vilnykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izoliatsiinomu masli [Diagnosis of oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in insulating oil. Methodical instructions]. (SOU-N EE 46.501:2006).
9. Anpilogov, N.G., Bederak, Y.S. (2010). *Metody kontroliia sostoianii i diagnostirovaniia sylovykh transformatorov klassom napriazheniia 35 kV i vyshe [Methods of condition control and diagnostics of power transformers of voltage class 35 kV and higher]*. Fort.
10. "GRIFRE". (2007). Pidhotovka ta provedennia khromatohrafichnoho analizu vilnykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izoliatsiinomu masli maslonapovnenoho elektroobladnannia : metod. Vkazivky [Preparation and chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in the insulating oil of oil-filled electrical equipment. Methodical instructions]. (SOU-N EE 46.302:2006).
11. International Standard. (1992). Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases (IEC publication 60567:1992-07).
12. Standart "VEA". (2015). Enerhetychni olyvy ta olyvni hospodarstva pidprijemstv enerhetychnoi haluzi Ukrainy, ta pidprijemstv, de zastosovuietsia analohichne obladnannia. Orhanizatsiia ekspluatatsii ta tekhnichnoho obsluhovuvannia. Normy ta vymohy [Energy oils and olive farms of enterprises of the energy sector of Ukraine, and enterprises where similar equipment is used. Organization of operation and maintenance. Norms and requirements]. (SOU VEA. 100.1/01:2015).
13. DP «UkrNDNTS», Derzhavnyy standart Ukrainy. (2019). *Olyva AMH-10. Tekhnichni umovy [AMG-10 oil. Technical specifications] (DSTU GOST 6794:2019)*.
14. Zaitsev, S.V., & Tychenko V.M. (2023). Diahnostuvannia enerhetychnoi olyvy v systemakh okholodzhennia nasosnykh ah-rehativ obladnannia elektrostantsii [Diagnostics of energy oil in cooling systems of pumping units of power plant equipment]. *Visnyk Khmelnytskoho natsi-onalnoho universytetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 2(1-319), 113–119. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-319-1-113-119.
15. Balitskii, O.A., Kolesnikov, V.O., Balitskii, A.I., Elias, J.J., Havrylyuk, M.R. (2020). Hydrogen effect on the high-nickel surface steel properties during machining and wear with lubricants. *Archives of Materials Science and Engineering*, 104-2, 49–57. DOI: 10.5604/01.3001.0014.4894.
16. IEEE. (2019). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA (IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104 -2008).

17. Zhelezny, V.P., Lukianov, N.N., Khliyeva, O.Ya., Nikulina, A.S. (2015). Eksperimentalnoe i raschetnoe issledovanie vliianiia nanochastits Al₂O₃ na teplofizicheskie svoystva rastvorov khladahenta R600a s kompressorным maslom [Experimental and calculational studies of the nanoparticle Al₂O₃ additives on thermalphysical properties of refrigerant R600a-compressor oil solution]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia – Refrigeration equipment and technology*, 51(4), 82–91. DOI: 10.15673/0453-8307.4/2015.44780
18. DP «UkrNDNTS», Derzhavnyy standart Ukrainy. (2019). *Poroshok midnyi elektrolitychnyi. Tekhnichni umovy [Electrolytic copper powder. Technical specifications] (DSTU GOST 6794:2019)*.
19. KVITS. (2009). *Pryimannia, zastosuvannia ta ekspluatatsiia transformatornykh masel. Normy otsiniuvannia yakosti [Acceptance, application and operation of transformer oils. Norms of quality assessment]*. (SOU-N EE 43.101:2009).
20. Trubky indykatorni SPH-1L (dlia fosfinu) [Indicator tubes SPH-1L (for phosphine)]. (n.d.). <https://greencold.com.ua/index.php/tovary/trubki-indikatornye-sph-1l>.
21. Dräger Safety AG & Co. (2015). *Spravochnyk po yndykatornym trubkam y CMS chypam kompanyy Dräger. Analiz pochvy, vody y vozdukha, a takzhe tekhnicheskyykh hazov [A guide to Dräger indicator tubes and CMS chips. Analysis of soil, water and air as well as technical gases]*. (17th edition). KGaA. Lübeck. https://www.kpo-elektro.ru/files/Air-flow_tester.
22. International Standard. (2010). *Detection and determination of specified additives in mineral insulating oils*. (IEC 60666:2010).
23. Standard by International Organization for Standardization. (2020). *Petroleum products – Transparent and opaque liquids – Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity* (ISO publication 3104:2020).
24. International Standard. (1997). *Insulating liquids – Oil-impregnated paper and pressboard – Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration* Paperback – Distributed through American National Standards Institute (ANSI) (August 19, 2007) (IEC publication 60814:1997)
25. Zaitsev, S., V. Tikhenko, V. (2023). Improving methods for monitoring bearing units of electric motors in reverse water supply systems of nuclear power plants. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 1-67, 96–105. DOI: 10.1527/opu.1.67.2023.12.

Отримано 18.03.2024

UDC: 621.89.098:537.52

Serhii Zaitsev

PhD in Technical Sciences, engineer of the Department of nuclear power plants
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

E-mail: sdjavidet@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR DETERMINING THE DEGRADATION OF ENERGY OILS UNDER THE INFLUENCE OF ACOUSTIC CAVITATION

The article is a publication of scientific and methodical character. The analysis of researches and publications has shown that it is urgent to continuously improve methods of determining the influence of acoustic cavitation on degradation of power oils in order to diagnose further the condition of these oils; develop measures to prevent such degradation or reduce its influence on the quality of power oils during their operation in oil-filled heat-mechanical equipment of a nuclear power plant.

The paper deals with the results of improving the method for determining the degradation of energy oils under the influence of acoustic cavitation. The aim of the study is to improve the reliability of the results of determining the effect of acoustic cavitation on the degradation of energy oils. Subjects of research: turbine oils "Azmol TP-22c", "Agrinol TP-22", "TP-30", "Reolube®OMTI" (based on trixylene phosphates), compressor oil "HF-12-16".

The paper improves the schematic diagram of an installation for studying the effect of acoustic cavitation on the degradation of energy oils, which allows performing studies at an ultrasonic emitter power of 20 W with frequencies up to 125 kHz.

During the study of the air (or hydrogen) content in turbine oils under the influence of ultrasonic cavitation in the presence of air (or hydrogen) above the surfaces of these turbine oils, it was shown that at a temperature of 20 °C, these turbine oils contain air (or hydrogen) in the form of an emulsion with a total content of the corresponding gas (air or hydrogen) of no more than 15 % by volume.

In the course of studying the effect of ultrasonic cavitation on the degradation of energy oils, it was found that under the influence of ultrasonic cavitation in energy oils: gases C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 , H_2 , CO , CO_2 are generated and dissolved in them; solid carbon particles are generated; the content of additives "Ionol", "B-15/41", "D-157" decreases. The presence of H_2S or SO_2 in gas flows over mineral turbine oils and the presence of PH_3 in gas flows over fire-resistant synthetic turbine oil under the influence of ultrasonic cavitation on these turbine oils was established. For the studied energy oils in the temperature range of 10-100 °C: an increase in temperature or ultrasonic irradiation leads to a decrease in the kinematic viscosity.

The results of research can be used for reasonable choice or design: measuring equipment for subsequent determination of the nature of degradation of demulsifying, deactivating, anti-wear and anti-foam additives, combined additives and inhibitors of oxidation and corrosion in power oils under the influence of acoustic cavitation in the bearing units of hydrogen-cooled turbine generators equipped with turbine oil circulation systems; elements of systems for diagnostics of the state of these power generators; elements of systems for diagnostics of the state of these power oils.

Keywords: energy oils; mineral turbine oils; flame retardant synthetic turbine oils; gas chromatography; dissolved gases; acoustic cavitation; additive "Ionol"; kinematic viscosity.

Fig.: 3. Table: 2. References: 25.

Iryna Kosogina¹, Yurii Fedenko², Nataliia Usova³

¹ PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Inorganic Substances, Water Treatment and General Chemical Technology

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

E-mail: kosoginairyna@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9795-7110>. **ResearcherID:** [I-3714-2018](https://orcid.org/0000-0002-9795-7110)

² PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Technology of Inorganic Substances, Water Treatment and General Chemical Technology

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

E-mail: fedenkoyura@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8599-1717>. **ResearcherID:** [K-5719-2017](https://orcid.org/0000-0002-8599-1717)

³ Student of the Department of Technology of Inorganic Substances, Water Treatment and General Chemical Technology National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: natausova4@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-2571-542X>. **ResearcherID:** [JVN-5838-2024](https://orcid.org/0009-0001-2571-542X)

COMPARATIVE CHARACTERIZATION OF SORPTION EFFICIENCY OF ACTIVATED CARBON SAMPLES MODIFIED WITH Fe₂O₃

It was found that the modification of commercial activated carbon grades F400 and AS-CS with ferric oxide obtained from alumina production waste "red mud" allows increasing the sorption capacity of activated carbon grade F400 to 60.241 mg/g (2 times). At the same time, the maximum sorption capacity of activated carbon AS-CS increases almost 7 times. The content of Fe₂O₃ fixed in the structure of activated carbon reaches 9.14%. It has been established that the modification forms an additional number of phenolic groups on the surface of the material, which contributes to an increase in the anion exchange capacity of the sorption material by 2.55 times. The sorption material is effective for removing phosphorus compounds from water at the level of 88.1% and can be recommended for use in the treatment of industrial water.

Keywords: activated carbon; modification; wastewater; sorption; red mud; iron oxide.

Table: 1. Fig.: 4. References: 15.

Introduction. Requirements for the chemical composition of process water are determined by the conditions of its use in specific technological processes. The largest amount of water is used to remove excess heat in heat exchange equipment. Some enterprises use tens or even hundreds of thousands of cubic meters of water per day just to compensate for losses in recycling systems.

In circulating systems, repeated heating of water to a temperature of 40–45°C and its cooling in cooling towers leads to the loss of carbon monoxide (IV) and the deposition of calcium carbonate on the surface of heat exchangers and pipes. Given the high constant hardness of the water due to the presence of calcium sulfate, evaporation in the cycle can lead to an excess of calcium carbonate solubility and the formation of stable carbonate deposits that are very difficult to remove from the walls of pipes and heat exchangers. The deposition rate of calcium carbonate and other salts should not exceed 0.25 g/(m²·h) [1]. Therefore, the main requirement for water used to feed circulating systems is to limit its carbonate and sulfate hardness. The content of suspended solids is also limited in feedwater and recycled water. The maximum salt content in recycled water is not recommended to exceed 2 kg/m³.

To prevent intensive biofouling of structures and apparatus of heat exchange circulating water supply systems, the content of biogenic elements in the circulating and feed water should be limited, which are the nutrient medium for microorganisms introduced into the system with fresh water. The permissible rate of biofouling is 0.07 g/(m²·h); the growth of the layer thickness should not exceed 0.05 mm per month [1]. Comparison of the requirements for the quality of recycled water in heat exchange water supply systems shows that they have much in common when recommending such important indicators as carbonate hardness, pH, nutrient content, and COD values that determine the thermostability and intensity of biofouling in a recycling system.

Replacing natural water for feeding recycling systems with wastewater requires a sufficiently large source with relatively constant pollutant characteristics, which are biologically treated wastewater (BTW). Such characteristics of biotreated wastewater as hardness, total salt content, chloride and sulfate content, concentrations of nutrient compounds, COD do not meet the requirements for feedwater of closed systems and require further treatment [2].

For the most part, biologically treated wastewater is only a feedstock for the preparation of process water at plants that use various combinations of physical and chemical methods to remove organic matter from water, adjust the salt content, and deep desalination. The possibilities of reusing BTW at enterprises of different industries are not the same, therefore, the required degree of complexity of additional treatment and preparation of water for technical needs may differ significantly. The most efficient and cost-effective methods are filtration, treatment of wastewater with reagents, sorption on activated carbon and ion exchange resins.

The usage of the filtration stage is due to the simplicity and reliability of the filtering facilities, as well as the low cost of such post-treatment. However, simple filtration cannot remove colloidal and dissolved pollutants from wastewater. As a result, the WW treated by filtration is of limited use in technical water supply systems. Such water cannot be used to feed fully closed water recycling cycles.

The use of coagulants can increase the degree of wastewater treatment and thereby expand the scope of possible use of treated water [3]. In this case, along with suspended particles, organic colloids, surfactants, and phosphates are removed from the water.

In cases where the methods of water treatment with coagulants and subsequent filtration are not effective enough and do not provide the degree of additional treatment of biologically treated wastewater specified by technological conditions or are unacceptable due to the impossibility of utilizing the resulting sludge, adsorption methods of deep wastewater treatment with activated carbon are used.

The widespread use of adsorption in wastewater treatment technology is because activated carbon is capable of removing organic substances of various origins from water, including those that cannot be destroyed by biological methods. It can remove organic contaminants to virtually zero residual concentrations.

For simultaneous purification from organic and inorganic components, it is necessary to modify activated carbon using various methods. The modifier can be ferrous and aluminum oxides.

The presence of ferrous oxides on the surface of activated carbon can increase the efficiency of catalytic oxidation of organic substances adsorbed by carbon [4]. For example, researchers in [5] found that the adsorption capacity increased by about 220% and 340% of the equilibrium adsorption result. The modification of activated carbon with metal oxides (Fe_2O_3 and Al_2O_3) increased the efficiency of highly polluted water purification to 70.73%, 56.40%, and 27.63% [6]. The source of aluminum and ferrous oxides can be alumina production waste "red mud" [7]. According to various data, it has been established that 1 to 2 tons of red mud is produced per 1 ton of aluminum products [8-10]. Over the past 20 years, the world has produced about 750 million tons of aluminum, and in 2022 alone, about 67.3 million tons [11]. There were two alumina refineries in Ukraine: "Zaporizhzhia Alumina Plant" and "Mykolaiv Alumina Plant", which annually produce up to 2 million tons of waste [12]. The aim of the work is to modify activated carbon with ferric oxide obtained from the commercial product FeCl_3 and alumina production waste "red mud" and to use the resulting sorption materials to purify process water for water reuse in production, which will contribute to the implementation of the principles of the circular economy.

To achieve this goal, it was necessary to solve the following tasks:

- to synthesize sorption materials based on activated carbon;
- to determine the main characteristics of the synthesized sorption materials;
- to test the effectiveness of the use of the obtained materials in comparison with commercial activated carbon on the real waters of the Bortnychi Aeration Station after treatment.

Objects of the research. The following brands of activated carbon (AC) were used in the study: AquaSorb CS (AS-CS), Jacobi Carbon Sweden and Filtrasorb 400 (F400), Calgon Carbon, USA. F400 is a granular activated carbon (effective size 0.80–1.00 mm) commonly used to remove dissolved organic compounds from water and wastewater.

A 40% FeCl_3 solution (HIMEFECT LLC, Ukraine) and red mud (RM) from Mykolaiv Alumina Plant, Ukraine, were used as a modifier. The chemical composition of Bayer red mud varies widely (%): Al_2O_3 8–20; SiO_2 4–12; Fe_2O_3 25–60; CaO 5–15; TiO_2 3–10; Na_2O 2–5 [13].

The characteristics of the synthesized sorption materials and commercial activated carbon were tested on model solutions of methylene blue (MB) dye according to DSTU 2965-94 with a concentration of 20 mg/l, which is used in water treatment to test activated carbon and real biologically treated wastewater from the Bortnychi Aeration Station (BAS) [14].

Research methods. The method of applying metal oxides to activated carbon (AC) is described in [13].

The number of surface groups, namely, anionic static exchange capacity (ASEC) and cationic static exchange capacity (CSEC), was determined by the Bem method [15].

The static exchange capacity in mg·eq/g was determined by the following formula (1):

$$SEC = \frac{(C_{init} - C_{fin}) \cdot V}{1000 \cdot m}, \quad (1)$$

where C_{init} and C_{fin} is the initial and final concentration of the solution used for neutralization, mg·eq/g; V is the volume of the solution taken for neutralization, cm^3 ; m is the weight of the sample, g.

To establish the sorption characteristics of the synthesized sorption materials, a model solution of methylene blue (MB) dye with a concentration of 20 mg/l was used, and sorption was carried out under static conditions. After obtaining the experimental data for each sample of the studied sorbent, sorption isotherms were constructed, followed by their mathematical processing using the Langmuir, Freundlich, and Temkin models, and the main sorption parameters were determined.

The adsorption value A (mg/g) was calculated by equation:

$$A = \frac{(C_{init} - C_{eq}) \cdot V}{m}, \quad (2)$$

where C_{init} , C_{eq} – initial and equilibrium concentrations of MB, mg/l; V is the volume of MB solution taken for adsorption, l; m is the mass of the sorbent, g.

The percentage of metal oxides on the surface and in the structure of the modified activated carbon samples was determined by changing the ash content of the sorbent samples at a temperature of 800°C for 1 hour. The content of iron/aluminum oxides was determined based on the change in sorbent mass before and after temperature exposure.

Samples of model solutions of methylene blue dye (20 mg/l) before and after sorption were analyzed by spectrophotometry at a wavelength of $\lambda = 670$ nm using a ULAB 101 spectrophotometer (manufactured in China), and the pH of the medium was studied using an ADWA AD1030 pH meter (manufactured in Hungary).

The phosphate content in water was determined according to the standard method by photometric method using ammonium molybdate, which forms a complex with phosphorus, which turns blue upon reduction with ascorbic acid.

Results and discussion. The results of studies of the sorption characteristics of samples based on activated carbons were analyzed. Fig. 1 shows the sorption isotherms of MB by samples based on activated carbon of the F400 grade: a sample of commercial activated carbon of the F400 grade (Fig. 1, curve 1), a sample of F400Fe – modified with FeCl_3 (Fig. 1, curve 2); a sample of F400RM – modified with red mud components (Fig. 1, curve 3).

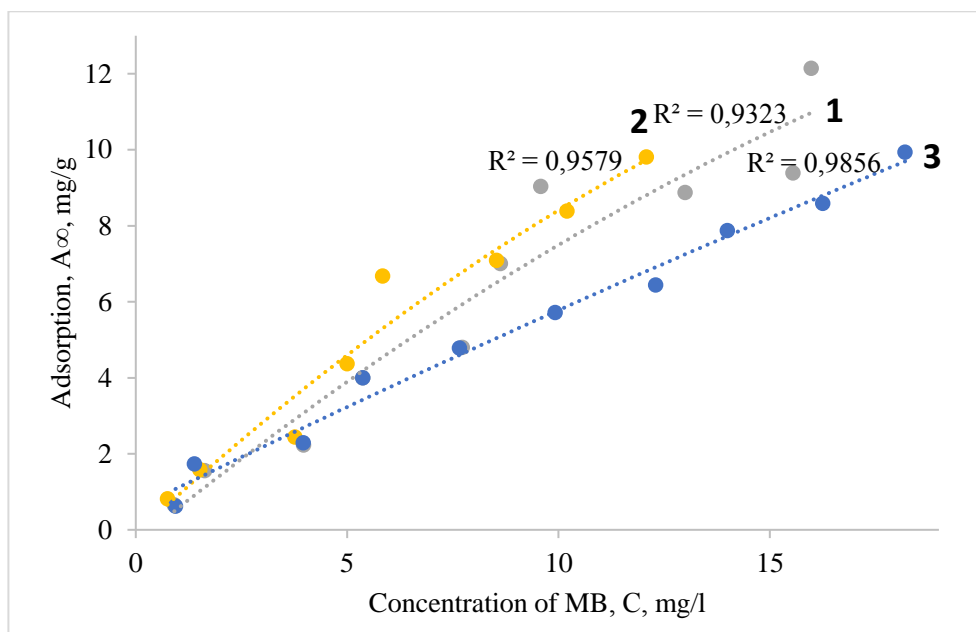


Fig. 1. Sorption isotherms on the tested samples based on activated carbon:
 1 – F400; 2 – F400Fe; 3 – F400RM

Source: developed by the authors.

Fig. 2 shows the sorption isotherms of MB by AS-CS activated carbon samples (Fig. 2, curve 1) and a sample of activated carbon modified with AS-CSRМ red mud components (Fig. 2, curve 2).

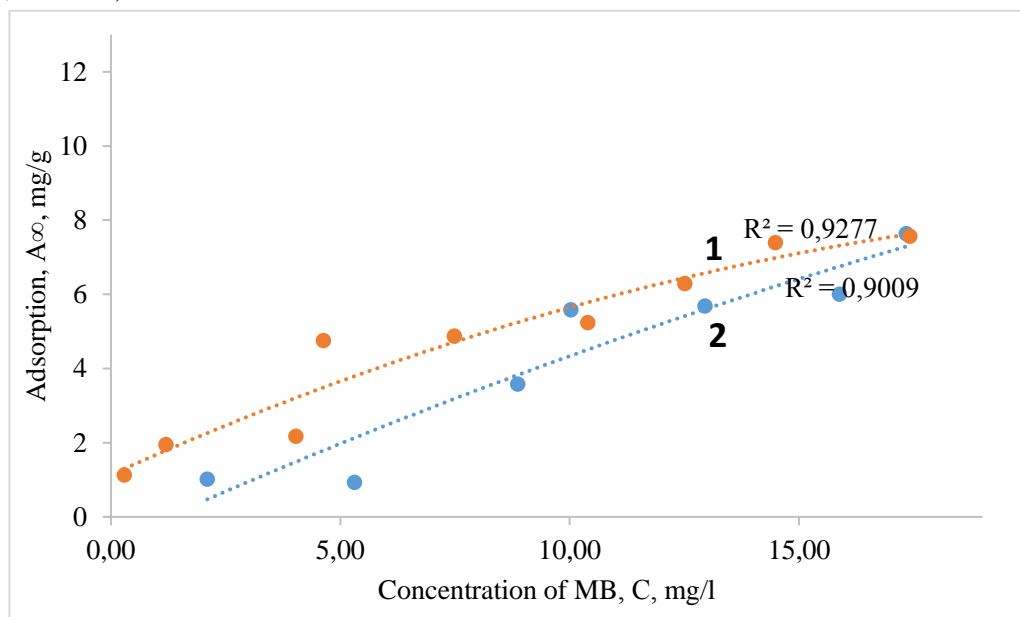


Fig. 2. Sorption isotherms on the studied samples based on activated carbon:
 1 – AS-CS; 2 – AS-CSRМ

Source: developed by the authors.

To compare the sorption characteristics of the studied activated carbon samples, the main sorption parameters obtained by mathematical processing using the Langmuir, Freundlich, and Temkin models were summarized in Table 1 (A_{∞} – limit adsorption; K_L – adsorption equilibrium constant according to the Langmuir model; K_F – adsorption equilibrium constant according to the Freundlich model; n – reaction order; B – constant related to heat of sorption; A_T – Temkin isotherm equilibrium binding constant; b – Temkin isotherm constant).

Table 1 - Comparison of sorption parameters on the studied samples of sorption materials

Parameter Sorbent	A_{∞} , mg/g	K_L , l/mg	K_F , l/mg	n	B, J/mol	A_T , l/g	b
F400	35,088	0,055	1,146	1,106	3,978	1,556	622,552
F400Fe	20,921	0,053	1,019	1,099	1,025	1,14	2415,745
F400RM	60,241	0,011	1,134	1,215	2,828	1,134	875,758
AS-CS	0,62	4,275	1,219	1,529	1,566	3,875	1581,24
AS-CSRМ	4,279	0,048	12,025	0,926	3,168	2,186	781,809

Source: developed by the authors.

As can be seen from Table 1, the sorption capacity of the commercial activated carbon sample F400 increases almost twice as much when modified with red mud from 35.088 mg/g to 60.241 mg/g, which indicates a change in the surface structure of the modified sample. At the same time, when F400 is modified with ferric chloride, the ultimate sorption decreases by 40.37%. We believe that this may be due to clogging of the pores of commercial activated carbon F400 by particles of the applied material. AS-CS carbon has a much lower capacity than F400 carbon. Due to the application of ferric oxide obtained from alumina production waste "red mud" on its surface, the ultimate sorption increased 6.9 times from 0.62 mg/g to 4.279 mg/g, but this is not enough to sorption pollutants.

Fig. 3 shows a comparative characteristic of the static exchange capacity (cationic and anionic) of the F400 activated carbon sample – commercial (unmodified) and modified with red mud components – F400RM.

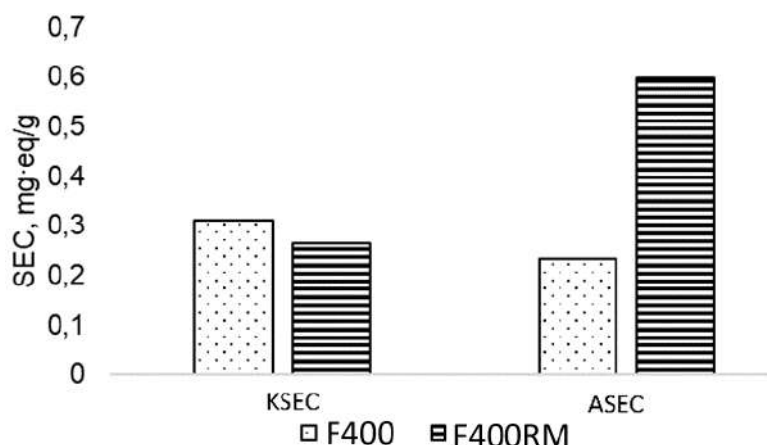


Fig. 3. Comparative characteristics of the static exchange capacity (cationic and anionic) of F400 activated carbon samples – unmodified (F400) and modified with red mud components (F400RM)

Source: developed by the authors.

It was found that after modification, the anion exchange capacity of the sorption material increased by 2.55 times from 0.234 mg·eq/g to 0.598 mg·eq/g. In our opinion, the increase in capacity was possible due to the opening of lactone groups and the formation of an additional number of phenolic groups in Fe-O-OH- and Al-O-OH- compounds on the surface of the material.

Fig. 4 shows photographs illustrating the results of ash content determination of samples of sorption materials.

The analysis of the data obtained on the change in ash content of the samples after heat treatment shows that when coal with applied ferric oxide as a modifier is burned, ferric oxide remains, which does not burn out and colors the ash orange (Fig. 4 b, c, e). It has been established that when modifying commercial samples of activated carbon, the content of activated carbon applied and fixed in the structure ranges from 4.66% to 9.14%.

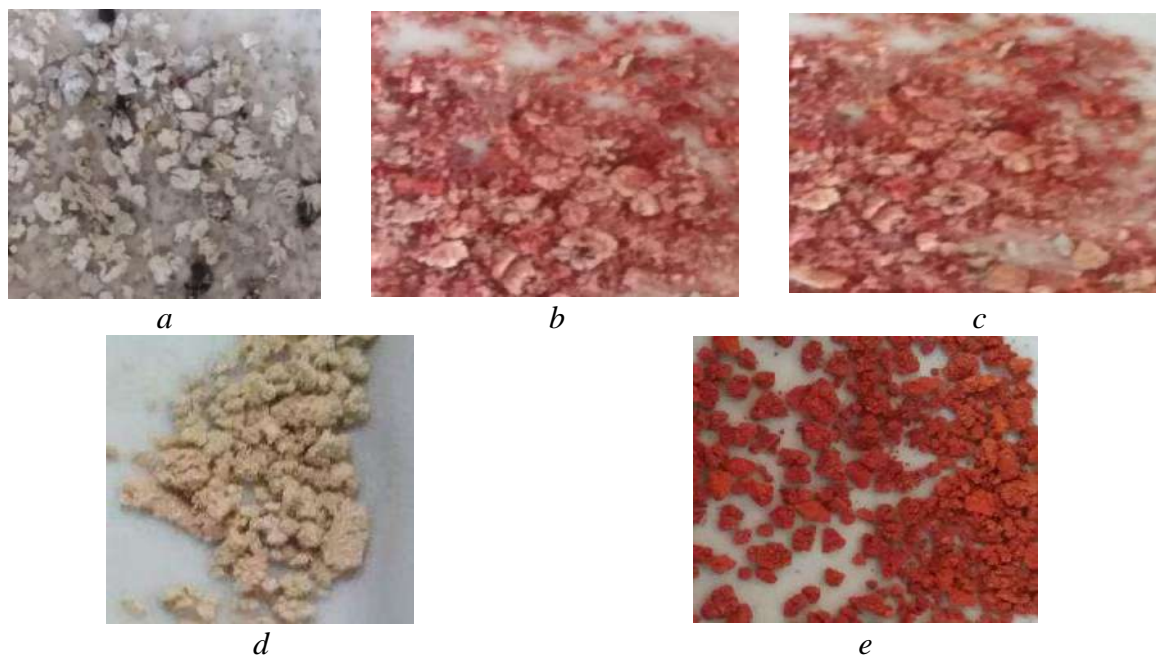


Fig. 4. Determination of ash content of samples of sorption materials: a – F400; b – F400RM; c – F400Fe; d – AS-CS; e – AS-CSRМ

Source: developed by the authors.

When obtaining sorption materials by the proposed method, it was found that the presence of ferrous oxides on the surface and in the pores of coal in an amount of up to 9.14% leads to a decrease in micropores from 1.4 to 1.32 nm and, accordingly, a decrease in the specific surface area by 10.34%. The surface chemistry of activated carbon changes during modification. Positively charged particles of ferrous oxide distributed over the surface of the modified material lead to energy heterogeneity of the surface. Surface groups have an impact on the completeness of sorbate fixation. Thus, the modification of F400 activated carbon with red mud proved to be effective and promising from the economic and environmental points of view.

Checking the efficiency of organic matter extraction. The effectiveness of the sorption materials was tested on real biologically treated BAS wastewater, which contained a large amount of organic matter and biogenic elements such as phosphorus and nitrogen. One of the indirect methods for determining organic matter in water is the oxidation test.

The most effective for the extraction of the organic component is a coal sample modified with ferric chloride (F400Fe), which is explained by the change in the surface structure of the original sample and the recharging of the surface of the modified material in the process of pollutant sorption. BAS water without additional treatment for COD can be used for recycled water and feed water of recycled water supply systems. Water purified with F400Fe sorption material is advisable to use in a closed cycle, since after post-treatment, the COD value of the water does not exceed 24.6 mgO₂/l, which meets the requirements for water circulating in the cycle.

Excess phosphate in water promotes the development of microorganisms, resulting in bio-fouling of pipelines, so its content is strictly limited. The initial concentration of phosphate in BAS water was 0.95 mg/l, and after water treatment with AS-CSRМ sorption material, the phosphate concentration decreased to 0.113 mg/l, i.e. the removal efficiency was 88.13%.

The hydrogen index of BAS water is 7.9, which is a satisfactory indicator for industrial water. When water is purified with different sorbents, the pH changes from 6.61 to 8.88, this water is suitable for use in various industries that require a pH value in the range of 6–10.

The total salt content of water purified by different sorbents varies from 390 mg/l to 455 mg/l with an initial mineralization of 910 mg/l. Water with this salt content is allowed to be used in closed water supply systems.

Conclusions. New sorption materials were obtained by modifying activated carbons of two grades: F400, F400Fe, F400RM, AS-CS, AS-CSRМ.

The surface characterization of the obtained activated carbons was carried out. It was found that the obtained sorbents have a higher value of the limiting sorption for methylene blue compared to the starting material. When activated carbon F400 is modified with red mud components, the value of the limiting adsorption increases from 35.09 mg/g to 60.24 mg/g, and the limiting sorption of activated carbon AS-CS increases almost 7 times.

The parameters of the sorption isotherms were calculated using the Langmuir, Freundlich, and Temkin mathematical models.

It was found that the ASUE of modified coal increases from 0.234 mg-eq/g to 0.5982 mg-eq/g due to the formation of Fe-O-OH- and Al-O-OH- compounds on the surface. It was found that the Fe₂O₃ content in the samples of sorption materials ranged from 4.66% to 9.14%.

It was confirmed that the components of alumina production waste "red mud" should be used as a modifier of activated carbon samples. In addition, the use of this waste can help reduce the accumulation in sludge pits and improve the environmental situation of water resources.

It was found that when using F400Fe, the COD of BAS water decreases from 49.15 mgO₂/l to 24.57 mgO₂/l. To achieve better efficiency of the F400Fe sample, it is necessary to study in more detail the effect of sorption parameters on the oxidation of organic matter. The sorption material AS-CSRМ is effective against phosphates in water at the level of 88.1% at an initial phosphate concentration of 0.95 mg/l.

References

1. Astrelin, I., Herasimenko, Yu., Bilousova, N., Kosogina, I., & Red'ko, R. (2022). Anticorrosion and antiscaling action of inhibitors in conditioned waste waters for Recirculation Systems. *Materials Science*, 57(6), 823–831. doi:10.1007/s11003-022-00612-y
2. Bilousova, N., Kosogina, I., Gerasimenko, Y., Kyrii, S., Kosohin, O. (2022). Influence of ultrasonic and reagent treatment regimes on corrosion and antyscaling properties in water circulating systems *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 57(4), 773–779.
3. Kyrii, S., Dontsova, T., Kosogina, I., Astrelin, I., Klymenko, N., & Nechyporuk, D. (2020). Local Wastewater Treatment by Effective Coagulants Based on Wastes. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5), 34–41. doi:10.12911/22998993/122184.
4. Zabneva, O. V., Smolin, S. K., Klymenko, N. A., Shvydenko, O. G., Synelnikova, A. V., & Nevynna, L. V. (2013). Biofiltration of the chlorophenol aqueous solution through the activated carbon bed. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 35(1), 36–42. doi:10.3103/s1063455x13010062
5. Chen, W.-S., Chen, Y.-C., & Lee, C.-H. (2022). Modified activated carbon for copper ion removal from aqueous solution. *Processes*, 10(1), 150–161. doi:10.3390/pr10010150
6. Affam, A. C. (2020). Modification of granular activated carbon by aluminium and iron oxides for decontamination of poultry slaughterhouse wastewater using Central Composite Design. *Desalination and water treatment*, 177, 48–59. doi:10.5004/dwt.2020.25030
7. Samal, S. (2021). Utilization of red mud as a source for metal ions—a review. *Materials*, 14(9), 11–22. Doi:10.3390/ma14092211
8. Li, J., Xu, L., Sun, P., Zhai, P., Chen, X. (2017). Novel application of Red Mud: Facile hydrothermal-thermal conversion synthesis of hierarchical porous aloooh and Al₂O₃ microspheres as adsorbents for Dye Removal. *Chemical Engineering Journal*, 321, 622–634. doi:10.1016/j.cej.2017.03.135.
9. Kumar, S., Kumar, R., & Bandyopadhyay, A. (2006). Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and Allied Industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 48(4), 301–314. doi:10.1016/j.resconrec.2006.03.003.
10. Sutar, H. (2014). Progress of red mud utilization: An overview. *American Chemical Science Journal*, 4(3), 255–279. doi:10.9734/acsj/2014/7258.
11. State Statistics Service of Ukraine (2023). Retrieved from <https://www.ukrstat.gov.ua>.
12. International Aluminium Institute. (n.d.). Retrieved from <http://www.world-aluminium.org/statistics>.

13. Kyrii, S., Maletskyi, Z., Klymenko, N., Ratnaweera, H., Mitchenko, T., Dontsova, T., & Kosogina, I. (2023). Impact of modification by Red Mud components on the sorption properties of activated carbon. *Applied Surface Science Advances*, 16, 1–13. doi:10.1016/j.apsadv.2023.100412

14. *Bortniczka stancziya aeraczii*. (n.d.). Retrieved from <https://www.vodokanal.kiev.ua/bortniczka-stancziya-aeraczii>.

15. Boehm, H. P. (2002). Surface oxides on carbon and their analysis: A critical assessment. *Carbon*, 40(2), 145–149. doi:10.1016/s0008-6223(01)00165-8.

Отримано 04.01.2024

УДК 628.35

Ірина Косогіна¹, Юрій Феденко², Наталія Усова³

¹ кандидат технічних наук, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водочищення та загальної хімічної технології
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: kosoginairyna@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9795-7110>. **ResearcherID:** [I-3714-2018](https://orcid.org/0000-0002-9795-7110)

² кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології неорганічних речовин, водочищення та загальної хімічної технології
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: fedenkoyura@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8599-1717>. **ResearcherID:** [K-5719-2017](https://orcid.org/0000-0002-8599-1717)

³ студентка кафедри технології неорганічних речовин, водочищення та загальної хімічної технології
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: natausova4@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-2571-542X>. **ResearcherID:** [JVN-5838-2024](https://orcid.org/0009-0001-2571-542X)

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СОРБЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗРАЗКІВ АКТИВОВАНОГО ВУГІЛЛЯ МОДИФІКОВАНИХ Fe₂O₃

Повторне використання біологічно очищених стічних вод в технологічному циклі (оборотна та технічна вода, вода для підживлення) на підприємствах різних галузей промисловості дозволить впровадити елементи циркуляційної економіки у виробництво, що, у свою чергу, мінімізує кількість шкідливих викидів у навколишнє середовище. Вимоги до води, яка буде повторно використовуватись, на кожному конкретному підприємстві дещо відрізняються, тому перед повторним застосуванням води необхідно здійснювати її доочищення. Встановлено, що найбільш ефективними та економічно доцільними методами доочищення є сорбційні процеси на активованому вугіллі, модифікованому Fe₂O₃.

В роботі здійснено характеристизацію сорбційних матеріалів, отриманих шляхом модифікації активованого вугілля марок F400 та AS-CS оксидом феруму різного походження. Синтез оксиду феруму на поверхні активованого вугілля здійснювали з товарного FeCl₃ та з FeCl₃, отриманого з відходів глиноземних виробництв «червоний шлам». Встановлено, що модифікація товарного активованого вугілля оксидом феруму, отриманим з відходів глиноземних виробництв «червоний шлам», дозволяє збільшити сорбційну ємність активованого вугілля марки F400 майже у два рази – з 35,088 мг/г до 60,241 мг/г. Гранична сорбція активованого вугілля марки AS-CS при цьому збільшується майже в 7 разів. Вміст нанесеного та закріпленого в структурі активованого вугілля Fe₂O₃ коливається в межах від 4,66 % до 9,14 % і призводить до зменшення розміру мікропор від 1,4 нм до 1,32 нм. Виявлено, що у результаті модифікації в 2,55 рази зростає аніонна обмінна ємність сорбційного матеріалу – з 0,234 мг-екв/г до 0,598 мг-екв/г – через формування на поверхні матеріалу додаткової кількості фенольних груп у сполуках. Сорбційний матеріал є ефективним для видалення з води сполук фосфору на рівні 88,1% при початковій концентрації фосфатів 0,95 мг/дм³.

Підтверджено, що Fe₂O₃, отриманий з відходів глиноземних виробництв «червоний шлам», доцільно використовувати як модифікатор зразків активованого вугілля з метою подальшого доочищення води та використання її у виробничому циклі.

Ключові слова: активоване вугілля; модифікація; стічні води; сорбція; червоний шлам; оксид феруму.

Табл.: 1. Рис.: 4. Бібл.: 15

Любов Мельник

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: luba_xtkm@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5139-3105>

ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИТУ ПРИ ВАРІЮВАННІ ДИСПЕРСНОСТІ НАПОВНЮВАЧА ТА ВИДУ ЗВ'ЯЗУЮЧОГО

Об'єктом дослідження стали композиційні матеріали з використанням відсівів андезиту як фракціонованого наповнювача та сополімерів як матриці. Встановлено зміни фізико-механічних властивостей композитів при варіюванні вмісту (55-85 мас.%) і гранулометрії наповнювача та виду полімерного зв'язуючого. За результатами тестувань показана можливість регулювання параметрів властивостей полімерних композитів, при цьому діапазон їх змін виглядає таким чином: водопоглинання 2,2-14,9 %, густина 1,24-1,96 г/см³ стиранисть 0,005-0,1 г/см², модуль пружності 41-83 Па/мм², що вказує на перспективність виготовлення та практичного використання отриманих зносостійких композитів у будівництві.

Ключові слова: композит; наповнювач; андезит; полімерна матриця; гранулометрія; властивості.

Табл.: 5. Рис.: 3. Бібл.: 12.

Постановка проблеми. Вибір композиційного матеріалу здійснюється переважно на основі фізико-механічних характеристик, які визначають ефективність його застосування в різних областях. Згідно з сучасними принципами матеріалознавства, зв'язок між складом, структурою та властивостями композитів залежить від типу наповнювача, матриці, технології та параметрів виробництва. Ступінь зв'язку компонентів, їх концентрація та рівномірність об'ємного розподілу визначають параметри структури, загальні фізико-механічні та спеціальні властивості композитів.

Використання різних типів сировини як наповнювача забезпечує можливість комплексного підходу до питань якості композитів та екології. Середі природної сировини особливу увагу привертають відходи нерудної промисловості, такі як відсівви видобутку та подрібнення магматичних порід, зокрема андезиту.

Розвиток науково-технічних засад технології полімерних композиційних матеріалів є предметом численних досліджень [1; 2].

Значна увага приділяється ролі наповнювачів у композитах, оскільки їх використання дозволяє суттєво зменшити кількість необхідних полімерів-зв'язуючих та підвищити властивості матеріалів [3].

Серед дисперсних наповнювачів основними є природні матеріали, такі як крейда, каолін, графіт [4; 5]. Останнім часом розширюється сировинна база наповнювачів завдяки дослідженням та використанню порід вулканічного походження, зокрема андезиту з різних родовищ [6-8]. Це викликає інтерес до використання андезиту як наповнювача в композиційних матеріалах, зокрема в будівельній галузі [9-11].

Розширення асортименту та підвищення експлуатаційної надійності композиційних матеріалів при застосуванні нових різновидів природної сировини визначають актуальність проведення цих досліджень.

Дослідження нових різновидів сировини, включаючи андезит, вимагає уваги до фізико-хімічного складу та його впливу на характеристики системи та властивості кінцевого продукту.

Метою цієї роботи є вивчення полімерних композитів на основі андезиту та різновидів полімерної матриці для подальшого розвитку технології виробництва.

Матеріали і методи дослідження. Об'єктом дослідження стали композиційні матеріали на основі системи сополімер – відсівви андезиту при варіюванні концентрації, гранулометрії наповнювача та видів зв'язуючого.

Методика роботи передбачала поєднання фізико-хімічних методів аналізу сировини та композитів на її основі з технологічними тестуваннями властивостей матеріалу:

- аналізі хімічного складу сировинних компонентів за стандартними методиками;
- рентгенофазовий аналіз (порошковий препарат) за допомогою дифрактометру ДРОН-3Мі (випромінювання Cu K α 1-2, напруга 40 kV, струм 20 mA, швидкість 2 град/хв);

- методи оцінки енергетичного стану поверхні частинок по змочуванню при натіканні [12];

- абразивну стійкість зразків визначали відповідно до ДСТУ Б.В. 2.7-212:2009 на крузі стирання типу Беме;

- механічні властивості визначали на випробувальній машині TIRAtest-2151.

Як зв'язуючий компоненті використовували різновиди сополімерів – водну дисперсію стирол-бутадієнову марки Latex 2012 та стирол-акрилову дисперсію марки Latex DC 640 (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристики сополімеру

Показники	Сополімер	
	Latex 2012	Latex DC 640
Хімічний склад	Стирол-бутадієн	
Вміст стиролу, %	30	50
Фізичний стан	Водна дисперсія білого кольору	Водна дисперсія білого кольору
Вмістом сухого залишку, %	51,0	40,0
Розмір часток, нм	140	50
В'язкість, МПа·с	200	20
pH	5,5	8,5
Температура (МТПУ), °C	< 5	< 5

Як наповнювачі використовували відсівні андезиту Хустського кар'єра Закарпатської області. За хімічним складом проба відсівів андезиту характеризується підвищеним вмістом SiO₂ при кількісному співвідношенні SiO₂ : Al₂O₃ = 3,5, оксидів заліза, лужноземельних і лужних оксидів типу RO + R₂O = 11,47 мас. % (табл. 2).

Таблиця 2 – Хімічний склад наповнювача

Назва проби	Вміст оксидів, мас. %								втрати при прокалюванні
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	
Андезит	59,70	16,97	8,42	0,72	5,76	1,21	2,68	1,82	1,11

За мінералогічним складом проба відсівів андезиту як різновид магматичних порід характеризується розвиненими кристалічними фазами, розподіленими у склофазі (рис. 1):

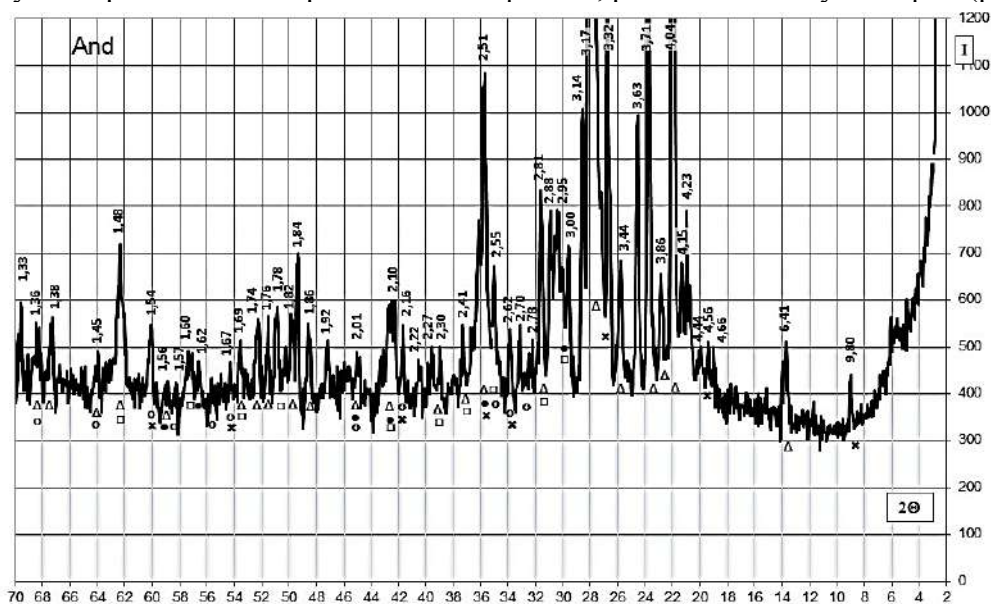


Рис. 1. Дифрактограма проби андезиту:

Δ – олігоклаз-андезин, ● – авгіт, □ – магнетит, o – рогова обманка, x – біотит

Технологія виготовлення композиту на основі системи сополімер – наповнювач складалась з послідовного виконання таких операцій:

- фракціонування наповнювача та дозування компонентів композиції;
- механоактивація наповнювача і зв'язуючого в кульовому млині (20 хвилин);
- виготовлення заготовок (дозування наважок масою 5,0 г та закладання їх у форми);
- визрівання композиції (48 годин при кімнатній температурі);
- термообробка заготовок (поступове підвищення температури та витримка 1 година при 80 °С);
- пресування (P = 5 МПа) зразків циліндричної форми з діаметром 16 мм.

Виклад основного матеріалу. У цій роботі досліджено системи з різновидами сополімерів Latex 2012 та Latex DC 640 як полімерної матриці при диференціації концентрації та гранулометрії андезиту як наповнювача. При цьому використовували проби Аф поліфракціонованого андезиту та Ам2 із тонкодисперсними частинками розміром < 0,5 мм (табл. 3).

Таблиця 3 – Гранулометричний склад андезиту

Код проби	Вміст фракцій матеріалу (мм), %				
	3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,2	<0,2
Аф	10	20	25	25	20

При аналізі особливостей формування структури досліджуваних композитів звертали увагу на процеси, що відбуваються на межі поділу фаз (Р-Тв) рідина (сopolімер) – тверде тіло (андезит).

Дослідження енергетичного стану поверхні частинок андезиту проводили з використанням методу Дерягіна [12], що базується на оцінці ступеня змочування при натіканні полярною та неполярною рідиною (вода і ксилол). Коефіцієнти фільтрації та питому ефективну поверхню розглядали як фактори взаємодії між наповнювачем та полімерною матрицею.

Результати експериментів показали, що відсів андезиту мають коефіцієнт ліофільності 0,51, а питома ефективна поверхня при змочуванні водою та ксилолом становить відповідно 10,11 та 5,03 м²/г (табл. 4).

Таблиця 4 – Властивості поверхні андезиту

Матеріал	$\frac{\text{Змочування при натіканні}}{\text{Коефіцієнт фільтрації}},$ К·10 ⁻⁶ см ³ ·с/г		Питома ефективна поверхня, м ² /г		Умовний, tgδ
	вода	ксилол	вода	ксилол	
Андезиті	$\frac{0,69}{1,35}$	$\frac{0,35}{0,63}$	10,11	5,03	0,027

Як свідчать результати випробувань, показники фізико-механічних властивостей композитів суттєво залежать від співвідношення концентрації наповнювача – андезиту та виду зв'язуючого. При цьому зі збільшенням концентрації наповнювача спостерігається загальна закономірність зростання густини та зменшення водопоглинання. Разом із тим, показники вказаних властивостей залежать від гранулометрії наповнювача та різновиду сополімеру.

Так, при використанні дисперсного андезиту Ам2 у порівнянні з поліфракціонованим Аф зразки композиту при використанні Latex 2012 як матриці характеризуються більшим водопоглинанням – 8,8-2,1 проти 5,6-1,8 % та меншою густиною – 1,33-1,85 проти 1,43-1,98 г/см³ (рис. 2 та 3). Слід зазначити, що аналогічна закономірність зберігається при заміні зв'язуючого на Latex 640, хоча кількісні показники дещо різняться. Так, для дисперсного андезиту Ам2 у порівнянні з поліфракціонованим Аф значення водопоглинанням будуть на рівні: 14,9-4,2 проти 10,2-3,8 % та меншою густиною – 1,33-1,83 проти 1,42-1,96 г/см³.

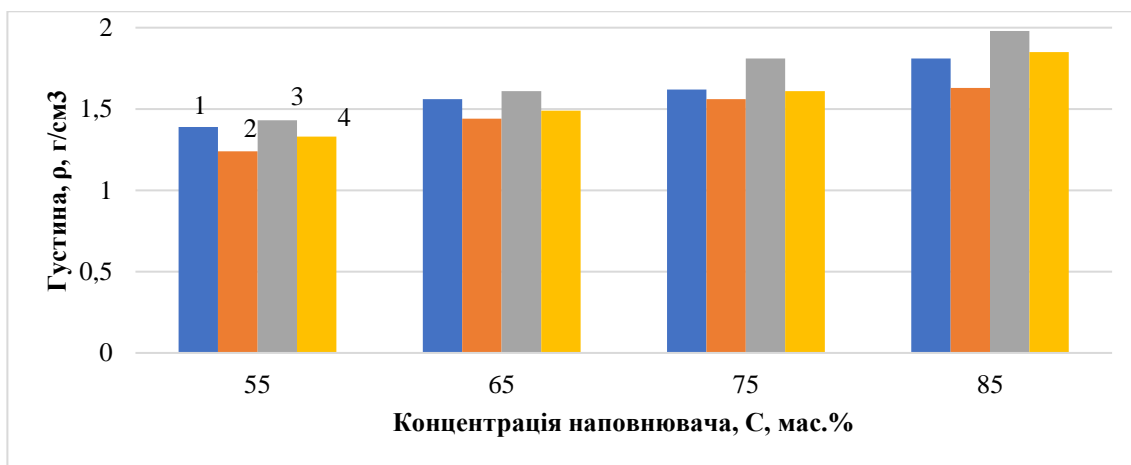


Рис. 2. Залежність густини композитів системи:

1 – а - Latex 640 + Ам2; 2 – Latex 640 + Аф; 3 – Latex 2012 + Ам2; 4 – Latex 2012 + Аф

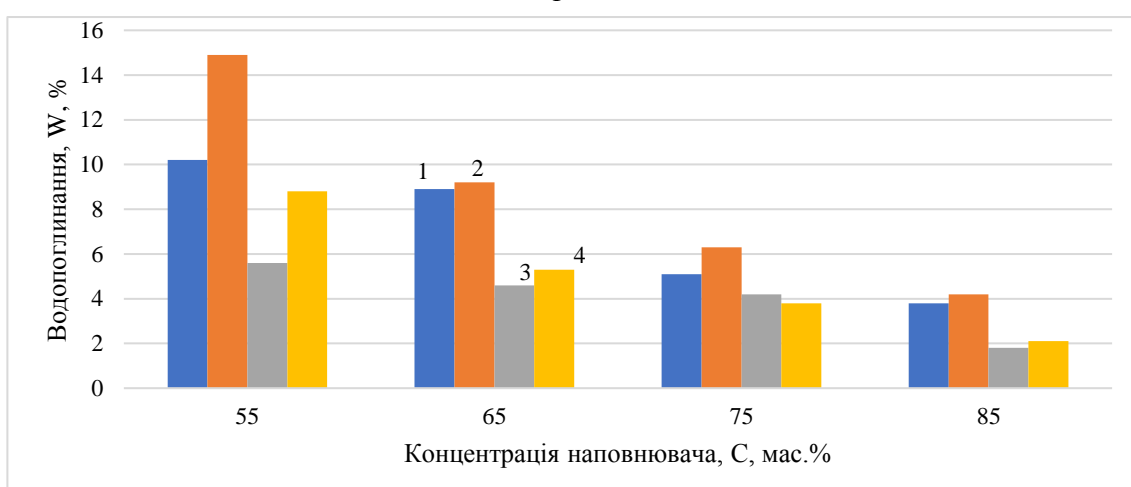


Рис. 3. Залежність водопоглинання композитів системи:

1 – а - Latex 640 + Ам2; 2 – Latex 640 + Аф; 3 – Latex 2012 + Ам2; 4 – Latex 2012 + Аф

Структурні відмінності дослідних зразків композиту визначаються характеристиками порової структури. За розрахунками на основі результатів тестувань встановлено, що при використанні дисперсного андезиту в порівнянні з поліфракційним має місце зменшення загальної та відкритої пористості. Ця тенденція зберігається при використанні обох видів зв'язуючого (табл. 5).

Таблиця 5 – Характеристики зразків композиту

Параметри	Композиті з використанням Latex 2012		Композит з використанням Latex DC 640	
	Аф	Ам2	Аф	Ам2
Загальна пористість, %	11,8–4,0	7,8–3,4	59,2–68,2	27,4–34,9
Відкрита пористість, %	8,8–2,4	5,4–1,8	18,5–3,7	15,8–7,5
Питома частка відкритих пор	0,74–0,60	0,69–0,53	0,31–0,05	0,58–0,21
Стираність, г/см²	0,01–0,02	0,005–0,015	0,02–0,04	0,1
Модуль пружності, Е, Па/мм²	44–83	57–72	52–61	41–59

Відзначене при використанні дисперсного андезиту зменшення кількості та питомої частки відкритих пор пов'язується:

- зі зростанням у композиті чисельності контактів частинок наповнювача;
- зі зростанням у композиті сил адгезії в системі сополімер-наповнювач при збільшенні дисперсності та, відповідно, вільної енергії поверхні частинок андезиту.

Вказані структурні відмінності зумовлюють визначені фізико-механічні (густину, водопоглинання, модуль пружності) та експлуатаційні (стиранність) показники властивостей композиційного матеріалу на основі закарпатського андезиту.

Висновки. Встановлено особливості введення до складу композиційних матеріалів відсівів андезиту як наповнювача в кількості 55-85 мас. % при варіюванні його гранулометрії та виду сополімеру як матриці. За результатами тестувань показана можливість регулювання показників властивостей полімерних композитів при варіюванні гранулометрії і концентрації наповнювача та виду сополімеру. При цьому діапазон змін показників виглядає таким чином: водопоглинання 2,2-14,9 %, густина 1,24-1,96 г/см³, стираність 0,005-0,1 г/см², модуль пружності 41-83 Па/мм².

Список використаних джерел

1. Landel, R. F. Mechanical properties of polymers and composites / R. F. Landel, L. E. Nielsen. – CRC Press eBooks, 1993. – 580 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b16929>.
2. Methods of Measuring the Thermal Conductivity of Bulk Solids and Thin Films (Review) / M. O. Haluschak, V. G. Ralchenko, A. I. Tkachuk, D. M. Freik // *Physics and Chemistry of Solid State*. – 2013. – № 14(2). – Pp. 317-344.
3. Rotheron, R. N. Particulate fillers for polymers / R. N. Rotheron // *Rapra Rev. Rep.* – 2001. – Pp. 16-17.
4. Melnyk, L. Research of electrical properties of epoxy composite with carbon fillers / L. Melnyk // *Technology audit and production reserves*. – 2017. – Vol. 3.(1/35) – Pp. 1539-1641.
5. Melnyk, L. I. Wear-resistant composite based on the andesite-copolymer system / L. I. Melnyk, L. P. Chernyak, A. O. Bilousova // *Colloquium-journal*. – 2020. – № 9(61) – Czesc 3. – Pp. 42-45. DOI: <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2020-11593>.
6. Kuno, H. Origin of andesite and its bearing on the Island arc structure / H. Kuno // *Bulletin Volcanologique*. – 1968. – Vol. 32. – Pp. 141-176.
7. Sarkar, S. S. The origin of andesite from Rajmahal traps, eastern India: A quantitative evaluation of a fractional crystallization model / S. S. Sarkar, S. K. Nag, S. Basu Mallik // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 1989. – Vol. 37, Is. 3-4. – Pp. 365-378.
8. Черняк, Л. П. Структурні зміни та властивості магматичних порід Західної України / Л. П. Черняк // *Кераміка: наука і життя*. – 2016. – № 4 (33). – С. 4-12.
9. Terzi, İ. U. S. Evaluation of andesite waste as mineral filler in asphaltic concrete mixture / İ. U. S. Terzi // *Construction and Building Materials* – 2012. – Vol. 31. – Pp. 284-288.
10. Мельник, Л. І. Композиційний матеріал на основі андезиту Закарпаття / Л. І. Мельник, Л. П. Черняк, О. В. Козловець // *Кераміка: наука і життя*. – 2020. – № 3 (48). – С. 13-17. DOI: <https://doi.org/10.26909/csl.3.2020.2>.
11. Study on the reuse of marble and andesite wastes in epoxy-based composites Polymer Composites / U. Soydal, S. Kocaman, M. E. Marti, G. Ahmetli. – 2018. – Vol. 39, Is. 9. – Pp. 3081-3091.
12. Deryagin, B. V. Device for determining the filtration coefficient and capillary impregnation of porous and dispersed bodies / B. V. Deryagin, N. N. Zakhavaeva, M. V. Talaev. – 1955.

References

1. Landel, R. F., & Nielsen, L. E. (1993). Mechanical properties of polymers and composites. In CRC Press eBooks. <https://doi.org/10.1201/b16929>
2. Haluschak, M. O., Ralchenko, V. G., Tkachuk, A. I., & Freik D. M. (2013). Methods of Measuring the Thermal Conductivity of Bulk Solids and Thin Films (Review). *Physics and Chemistry of Solid State*, 14(2), 317-344.
3. Rotheron, R. N. (2001). Particulate fillers for polymers. *Rapra Rev. Rep.* 16-17.
4. Melnyk, L. (2017). Research of electrical properties of epoxy composite with carbon fillers. *Technology audit and production reserves*, 3.(1/35), 1539-1641.
5. Melnyk, L.I., Chernyak, L.P., & Bilousova, A.O. (2020). Wear-resistant composite based on the andesite-copolymer system. *Colloquium-journal*, 9(61), 42-45. <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2020-11593>.
6. Kuno, H. (1968). Origin of andesite and its bearing on the Island arc structure. *Bulletin Volcanologique*, 32, 141-176.

7. Sarkar, S.S., Nag, S.K. & Mallik, S.Basu. (1989). The origin of andesite from Rajmahal traps, eastern India: A quantitative evaluation of a fractional crystallization model. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37(3-4), 365-378.
8. Chernyak, L.P. (2016). Structural changes and properties of igneous rocks of Western Ukraine. *Ceramics: science and life*, 4 (33), 4-12.
9. Uzu, İ., Terzi, S. (2012). Evaluation of andesite waste as mineral filler in asphaltic concrete mixture. *Construction and Building Materials*, 31, 284-288.
10. Chernyak, L.P. (2020). Composite material based on Transcarpathian andesite. *Ceramics: science and life*, 3(48), 13-17. <https://doi.org/10.26909/csl.3.2020.2>.
11. Soydal, U., Kocaman, S., Marti, M. E. & Ahmetli, G. (2018). Study on the reuse of marble and andesite wastes in epoxy-based composites. *Polymer Composites*, 39(9), 3081-3091.
12. Deryagin, B.V., Zakhavaeva, N.N., & Talaev, M.V. (1955). Device for determining the filtration coefficient and capillary impregnation of porous and dispersed bodies.

Отримано 05.01.2024

UDC 66.03:678

Liubov Melnyk

PhD, Associate Professor, Department of Chemical Technology of Composite Materials
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: luba_xtkm@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5139-3105>

FORMATION OF COMPOSITE WITH VARIATION OF DISPERSITY OF FILLER AND TYPE OF BINDER

The aim of this study was to investigate polymer composites based on andesite of different dispersion as a filler with different types of polymer matrix for further development of production technology. Varying the types and concentration of mineral fillers of different genesis, including volcanic rocks, is one of the ways to modify polymer composite materials. The choice of filler type is an important factor influencing the structure formation and properties of the resulting composite. At the same time, varying the particle size distribution of the filler and its quantitative ratio with the matrix makes it possible to adjust the performance properties of the resulting composite materials within a wide range. In addition, the surface properties of the filler particles and the chemical nature of the polymer matrix are of great importance. The possibility of expanding the range and increasing the operational reliability of composite materials when using new types of natural raw materials determine the relevance of this research.

To achieve this goal, a set of modern methods of physical and chemical analysis and standardised testing of materials was used in the study. The object of the study was composite materials using andesite screenings as a fractionated filler and copolymers as a matrix. Changes in the physical and mechanical properties of the composites were determined by varying the content (55-85 wt.%) and granulometry of the filler and the type of polymeric binder. According to the test results, it is possible to adjust the parameters of the properties of polymer composites, while the range of their changes is as follows: water absorption 2.2-14.9 %, density 1.24-1.96 g/cm³, abrasion 0.005-0.1 g/cm², elastic modulus 41-83 Pa/mm², which indicates the prospects of manufacturing and practical use of the obtained wear-resistant composites in construction.

Key words: composite; filler; andesite; polymer matrix; granulometry; composition; properties.

Table: 5. Fig.: 3. References: 12.

Вікторія Челябієва¹, Наталія Буяльська², Наталія Березкина³

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vika.chl@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5364-4633>. **ResearcherID:** [AAA-3194-2020](https://publons.com/urn:li:member:AAA-3194-2020)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: buialaska@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604>. **ResearcherID:** [G-2935-2014](https://publons.com/urn:li:member:G-2935-2014)

³старший викладач кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: galenko94@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0000-0952-5557>

**МІКРОФЛОРА БОРОШНА ЯК СТАРТЕР ПРОЦЕСІВ БРОДІННЯ
У ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

У роботі проведена аналітична оцінка мікробіоти борошна, охарактеризовані симбіотичні асоціації мікроорганізмів, які виникають при заквашуванні борошна, та вплив ендогенних факторів на розвиток цих мікробних симбіозів. Аналіз був застосований для вивчення можливості використання борошна та закваски борошна як стартера бродіння у харчових технологіях. Досліджено вплив біохімічних характеристик бродильного середовища на склад асоціацій організмів в заквасках інокульованих у ці середовища. Показано, що мікробіота борошна може бути стартером процесів бродіння, що може бути використано у технології хлібобулочних, кисломолочних, алкогольних виробів.

Ключові слова: борошно; закваска; хміль; молочнокислі бактерії; дріжджі; кисломолочні продукти.

Рис.: 4. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Мікрофлора борошна визначається насамперед мікрофлорою зерна. Склад мікрофлори борошна залежить від виду зернової культури, температури, сорту борошна, способів помелу та очищення [1]. Кількість колонієутворюючих одиниць (КУО) мікроорганізмів становить 2–3 млн на 1 г борошна. До мікрофлори борошна зазвичай входять трав'яна, сінна, молочнокислі та оцтовокислі палички, дріжджі, спори цвілевих грибів, переважно це види родів *Penicillium* і *Aspergillus*, інколи мукові гриби, лактококи, ентерококи та стрептококи зустрічаються рідко [1; 2]. Мікрофлора борошна за КУО бідніша порівняно з мікрофлорою зерна, тому що в процесі помелу разом із забрудненнями й оболонками зерна, багатими на мікроби, видаляється значна кількість мікроорганізмів.

Мікроорганізми не розвиваються, якщо вологість борошна не перевищує 14 %, вони при цьому знаходяться у стані анабіозу. При зволоженні борошна мікроорганізми активуються і ініціюють процеси бродіння та гниття. Перебіг цих процесів залежить як від ендогенних, так і від екзогенних факторів. Ендогенні фактори визначаються хімічним і мікробіологічним складом самого середовища, а екзогенні – переважно температурою. Вплив цих факторів під час розмноження мікроорганізмів борошна сприяє накопиченню характерної бактеріальної мікрофлори, яка знижує рН середовища, сприяє накопиченню протигрибкових речовин, і тим самим, запобігає росту небажаних мікроорганізмів, які походять від забруднення сировини і, як правило, спричиняють гнилісні процеси [2].

Актуальним є вивчення впливу ендогенних факторів на домінування мікроорганізмів у бродильному середовищі, такі дослідження надають обґрунтування кустарній практиці отримання бродильної продукції [3].

Постановка проблеми. Кустарна технологія бродильної продукції, як правило, дає можливість отримати продукцію з високою біологічною та харчовою цінністю і часто включає використання борошна як стартера процесу бродіння. Житнє або цільнозернове пшеничне борошно є стартером бродильних процесів при виведенні хлібних заквасок, зброджуванні сусла при кустарному способі виробництва пива, хлібна закваска ініціює зброджування молока з отриманням кисломолочних продуктів [4].

Потребує вивчення мікробіота, які розвивається у тому чи іншому поживному середовищі при використанні борошна як стартера процесів бродіння, і ендогенні фактори, що сприяють її розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При змішуванні борошна з водою 1:1 за масою стартує процес бродіння. На 7–10 день після змішування та кількарразового оновлення шляхом видалення приблизно $\frac{1}{3}$ частини суміші та додавання свіжого борошна і води у рівних кількостях утворюється закваска [5]. Закваска відіграє важливу роль у приготуванні хлібного тіста. Вона підвищує поживні властивості (наприклад, через фітатний гідроліз), покращує органолептичні показники готового виробу, наприклад, об'єм хліба, текстуру м'якушки та забезпечує унікальний смак, впливає на зберігання готового виробу (термін придатності) [1–3]. Закваску можна виготовити у пекарні або придбати у комерційних постачальників (жива рідка закваска або сушена закваска без ферментації). Проте багато пекарень житнього хліба в Європі все ще використовують не комерційні, а традиційні ферментовані закваски, метаболічно активні протягом десятиліть за рахунок додавання свіжого борошна та води через регулярні проміжки часу [1]. У багатьох країнах і протягом останнього десятиліття в Україні практикують «домашню» (кустарну, крафтову) випічку кислого житнього хліба на традиційних заквасках.

Суміш борошна з водою ферментується бактеріальними та дріжджовими спільнотами. Молочнокислі бактерії, оцтовокислі бактерії і дріжджі зазвичай походять із борошна, тобто борошно є стартером бродіння [6–8]. Молочнокислі бактерії (LAB) і дріжджі часто поєднуються в заквасці. Співвідношення LAB: дріжджі в заквасках зазвичай становить за різними оцінками 80:1, 100:1 [8]. У той час як у більшості ферментованих харчових продуктів, особливо кисломолочних, відіграють важливу роль гомоферментативні LAB, гетероферментативні LAB, серед яких *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus brevis* домінують у хлібній заквасці, особливо при традиційному (кустарному) приготуванні [7]. Закваска є проміжним продуктом для приготування хліба, пива і містить метаболічно активні мікроорганізми. Закваски є величезним джерелом різноманітних видів і штамів LAB та дріжджів завдяки своєму кустарному і залежному від регіону походженню.

У заквасці маємо приклад синергізму між LAB та дріжджами. LAB є переважаючими мікроорганізмами, і в багатьох випадках дріжджі присутні у значній кількості.

LAB не утворюють спор, є грампозитивні факультативні анаероби, продукт обміну – молочна кислота, більшість LAB – мезофіли. Молочнокислі бактерії утворюють від 1 % до 3 % молочної кислоти та розвиваються при рН 4. Продукт метаболізму LAB – молочна кислота – пригнічує розвиток маслянокислих і гнильних бактерій, які у свою чергу пригнічують розвиток дріжджів, тобто LAB сприяють розвитку дріжджів. Дріжджі *Saccharomyces minor* відрізняються більшою кислотостійкістю порівняно із *Saccharomyces cerevisiae*. Зі зниженням рН середовища культивування активність дріжджів помітно погіршується, а при кислотності 13–14 °Н вид *Saccharomyces cerevisiae* починає витіснятися дріжджами *Saccharomyces minor*. Збільшення, вологості закваски до 75% знижує інтенсивність кислотонакопичення в результаті зменшення кількості живильних речовин для молочнокислих бактерій.

У свою чергу дріжджі збагачують середовище вітамінами і амінокислотами, які необхідні для життєдіяльності LAB і поглинають із середовища кисень, а це сприятливо відбивається на розвитку молочнокислих бактерій, які є факультативними анаеробами. Спирт, що продукується дріжджами, пригноблює сторонні види бактерій, але не пригнічує LAB.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На бродильну мікрофлору впливають умови середовища культивування, той вид, який починає домінувати в середовищі, для якого ендогенні умови виявилися сприятливішими й буде визначати особливості бродильного процесу і властивості готового продукту. Вплив ендогенних факторів на асоціацію молочнокислих бактерій і дріжджів потребує подальших досліджень, такі дослідження відкривають шляхи для розширення асортименту харчових продуктів бродіння.

Мета роботи. Дослідження асоціації молочнокислих бактерій та дріжджів різних заквасок залежно від ендогенних факторів для диференціації продуктів бродіння.

Виклад основного матеріалу. В Україні в домашньому виробництві традиційно практикувалось використання хмелевої закваски для випікання хліба. За одним із способів приготування 20 г хмелю заливають 1,5 л води і варять після закипання 20 хвилин, при цьому вся мікрофлора і спори гинуть. Отриманий відвар хмелю вже не містить мікрофлори і є стерильним, його охолоджують до кімнатної температури, проціджують і додають мед, отриманий розчин заливають у посудину для бродіння, вносять для ініціювання бродіння борошно житнє або цільнозернове пшеничне чи пшеничне першого сорту, і перемішують. Співвідношення відвару і борошна 2:1. Приготовану суміш (закваску) залишають закисати при температурі 30–32 °С протягом 5–7 днів до появи специфічного приємного запаху, протягом цього часу закваска не потребує оновлення.

Згідно із сучасними дослідженнями хмелеві закваски без додавання меду мають вищі показники якості [9], мед традиційно вносили, як джерело поживних речовин, які також надають певного смакового забарвлення виробу.

Нами було приготована за традиційною методикою закваска з додаванням борошна пшеничного цільнозернового і досліджена її мікрофлора (рис. 1).

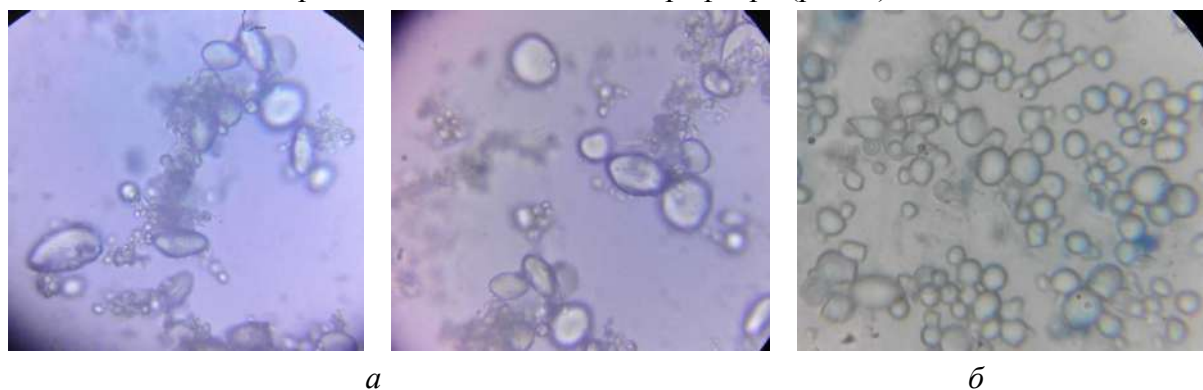


Рис. 1. Мікрофлора хмелевої закваски на 3 день бродіння (а); на 7 день бродіння (б) (препарат живої культури, збільшення 1200).

На препараті наявні клітини дріжджів, які на 7 день бродіння присутні у великій кількості. При інокуляції мікрофлори борошна у відвар хмелю для ініціювання бродіння спостерігаємо, що у хмелевому середовищі й у отриманій хмелевій заквасці домінуючими є культури роду *Saccharomyces*. Культури LAB не присутні у хмелевій заквасці. На склад мікрофлори впливають у даному випадку ендогенні фактори, тобто біохімічний склад хмелевого середовища. Поширена серед споживачів думка, що хліб приготований на хмелевій заквасці є без дріжджів, хибна. Саме дріжджі складають мікрофлору хмелевої закваски. Однак, якщо отриману хмелеву закваску багаторазово оновити житнім борошном і водою, а для цього вносити у хмелеву закваску протягом 5 днів по 20 г борошна і води, то концентрація біохімічних речовин хмелю знизиться і LAB житнього борошна почнуть розвиватися у такому середовищі поряд з культурою дріжджів. Відбудеться переродження закваски, вона за своїм мікробіологічним складом стане подібною до закваски, яку отримують при спонтанному бродінні шляхом змішування житнього борошна і води.

Приготована хмелева закваска була використана для випікання житньо-пшеничного хліба (рис. 2). Готовий виріб мав правильну з випуклою верхньою скоринкою форму, м'якушка виробу пропечена, не липка, еластична на дотик, з гарною пористістю, що видно з рис. 2. Після легкого натискання пальцями м'якуш приймає початкову форму. М'якуш без грудочок і слідів непромісу, без пустот і ущільнень. Запах характерних хлібний, смак хлібний. Стосовно смаку слід зауважити, що не відчувалась кислуватість, характерна для виробів на заквасках з LAB. Тобто у випадку хмелевої закваски маємо саме дріжджову закваску, де домінуючою культурою є дріжджі, а не LAB.



Рис. 2. Зовнішній вигляд (а) та вид у розрізі (б) житньо-пшеничного хліба на хмельовій заквасці

Хміль за своїми властивостями унікальна рослина. Шишки хмелю містять у собі комплекс специфічних смол, поліфенольних сполук, ефірних олій, біологічно активних речовин, які володіють не тільки характерними смаковими та ароматичними властивостями, а проявляють антибіотичні, антиокиснювальні властивості. Доведено протиінфекційну дію хмелю проти широкого спектра мікроорганізмів [10]. Методом хромато-мас-спектрометрії досліджено якісний та кількісний склад біологічно активних сполук селекційних сортів шишок хмелю ароматичного та гіркокого типу [11]. У шишках ароматичного сорту хмелю переважно містяться поліфенольні сполуки, а у шишках гіркокого сорту – α - та β -кислоти та терпенові сполуки.

Крамер та ін. [12] досліджували антимікробну дію *in vitro* кількох екстрактів хмелю проти *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella enterica* та *Escherichia coli* у модельному м'ясному маринаді та на маринуваних свинячих вирізках. Результати, отримані авторами, показали, що грампозитивні бактерії сильно пригнічувалися екстрактами хмелю завдяки вмісту β -кислот, але у випадку екстрактів, що містять α -кислоти, пригнічення було нижчим; навпаки, грамнегативні бактерії показали високу резистентність до всіх досліджених екстрактів хмелю.

При використанні борошна або хлібної закваски в кустарному способі приготуванні пива, або при внесенні борошна у хмельовий відвар для отримання хмельової закваски для хліба відбувається пригнічення широкого спектра мікроорганізмів екстрактивними речовинами хмелю, у тому числі й LAB, які є грампозитивними мікроорганізмами, а от дріжджі в цих умовах активно розвиваються і запускають процес спиртового бродіння, що і стало використовуватись людиною. Ізо- α -кислоти не змінюють активність *S. cerevisia* [11].

Найпростіший спосіб кустарного приготування пива передбачає змішування ячмінного солоду з водою і настоювання суміші протягом доби до розчинення. Далі суміш варили протягом двох годин, а потім у цю суміш вносили шишки хмелю і продовжували варити ще 20–30 хвилин. При таких умовах відвар насичується екстрактивними речовинами, за рахунок тривалої термічної обробки знищуються мікроорганізми, у тому числі ті, які утворюють спори. Відвар охолоджували, проціджували, а потім вносили висівки, борошно або хлібну закваску, з якої випікали хліб, для ініціювання процесу бродіння. Потім рідину переміщували в тепле місце з температурою 26–28 °C на 12-18 годин. Після закінчення зазначеного часу пиво було готове до вживання.

Внесення хлібної закваски, яка містить LAB та дріжджі – оптимальний варіант при кустарному виробництві пива, тому що на відміну від висівок і борошна, закваска не містить патогенної мікрофлори. Як зазначалося вище, у хлібній заквасці продукт метаболізму LAB – молочна кислота – пригнічує розвиток маслянокислих, гнильних бактерій та іншої патогенної мікрофлори. При внесенні хлібної закваски у хмелевий відвар у процесі приготування пива молочнокислі бактерії закваски пригнічуються під дією екстрактивних речовин хмелю, а дріжджі починають активно розвиватися і запускають спиртове бродіння.

Для ферментації молока здавна використовують кефірний грибок [13], який є специфічною та складною асоціацією мікроорганізмів, який включає дріжджі молочнокислі бактерії (LAB), а іноді й оцтовокислі бактерії [14]. Зерна кефіру вважаються багатофункціональною закваскою в харчовій промисловості, оскільки вони використовуються в різних ферментованих системах, таких як хліб, сир і молоко, з дуже багатообіцяючими результатами.

У роботі [4] показано, що густа закваска отримана із борошна житнього і води містить гетероферментативні LAB і дріжджі, тобто за складом вона подібна до зерна кефірного грибка і здатна забезпечити змішане бродіння коров'ячого молока. Нами отримані кисломолочні продукти, у технології яких для ініціювання бродіння була використана житня закваска (рис. 3, а). Отримані кисломолочні напої та сири (рис. 3, б) мали чистий не кислий смак (рН ~5), ніжну консистенцію, білий колір.



а



б

Рис. 3. Зовнішній вигляд густої житньої закваски (а) та виробленого на її основі кисломолочного сиру (б)

У симбіотичній асоціації кефірного грибка залежно від регіону його походження домінуючими LAB є види *Lactobacillus kefir*, *Lactobacillus kefirianofaciens* spp., *Lactobacillus helveticus*, *Lactobacillus casei*, а поширеними видами дріжджів є *Kluveromyces marxianus*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces unisporous*, *Rodosporidium kratochvilovae*, *Kazachstania exigua*, *Dekkera anomala*, дріжджі роду *Candida*, зустрічаються базидіальні гриби роду *Cryptococcus* [13, 14].

В асоціації мікроорганізмів густої житньої закваски переважають гетероферментативні LAB, які утворюють до 72 % молочної кислоти, до 21 % легких кислот (переважно оцтову), газ (переважно діоксид вуглецю) і незначну кількість спирту, та специфічні для житнього борошна дріжджі *Saccharomyces minor*, які відрізняються кислотостійкістю, не вимогливі до джерел вітамінного та азотного харчування, спиртостійкі. Основним субстратом для гетероферментативного молочнокислого бродіння є мальтоза – солодовий цукор, який міститься у житній заквасці у великій кількості.

Молочний цукор – лактоза – субстрат для гомоферментативного молочнокислого бродіння. Гомоферментативне бродіння здійснюють представники роду *Streptococcus* і багатьох видів роду *Lactobacillus*, які у свою чергу також присутні в асоціації мікроорганізмів густої житньої закваски. При внесенні житньої закваски у молоко для ініціювання бродильного процесу LAB, потрапивши під вплив сприятливих для них ендогенних факторів, активно розвиваються, а життєдіяльність дріжджів цієї асоціації пригнічується.

Кисломолочний продукт, отриманий нами шляхом ініціювання житньою закваскою бродіння молока, має однорідну консистенцію (рис. 4, а), приємний запах з нотками аромату свіжовипеченого хліба, а мікрофлора такого кисломолочного продукту переважно складається з кокових LAB роду *Streptococcus* (рис. 4, б).

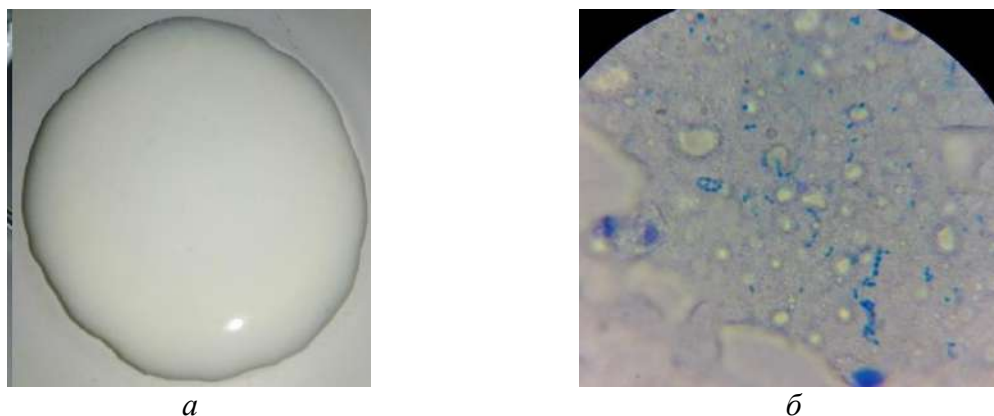


Рис. 4. Зовнішній вигляд кисломолочного продукту заквашеного на житній заквасці (а) та його мікрофлора (імерсійна мікроскопія, збільшення у 1800 раз) (б).

При внесенні хмелевої закваски у молоко через 12 години вже спостерігається розшарування на сироватку і сирне зерно, через те що домінуючою мікрофлорою хмелевої закваски є саме дріжджі, вони запускають спиртове бродіння, внаслідок чого частка спирту зростає до 2,5 % при нормі для кисломолочних продуктів 0,2–0,6 %, і відбувається згортання білків молока.

Висновки. Мікрофлора борошна визначає широкі можливості застосування закваски на борошні у технології продуктів бродіння. При заквашуванні житнього або цільнозернового пшеничного борошна патогенна мікрофлора пригнічується, утворюється симбіотична асоціація LAB і дріжджів. При внесенні такої культури у поживне середовище, залежно від того, які цукри та інші екстрактивні речовини переважають у субстраті та інших ендогенних факторів, активно розвиваються або LAB, або дріжджі, або обидва види цих культур мікробної асоціації закваски, запускаючи бродильний процес у субстраті. Закваски на борошні можна використовувати як стартер процесів бродіння субстратів багатих на цукри (цукрозу, мальтозу, лактозу та ін.) для отримання харчових продуктів, які розширяють асортимент існуючих за рахунок органолептичних характеристик, пробіотичних властивостей тощо.

Список використаних джерел

1. The lactic acid bacteria and yeast microbiota of eighteen sourdoughs used for the manufacture of traditional Italian sweet leavened baked goods / A. Lattanzi, F. Minervini, R. Di Cagno, A. Diviccaro, L. Antonielli, G. Cardinali, S. Cappelle, M. De Angelis, M. Gobbetti // *International Journal of Food Microbiology*. – 2013. – Vol. 163, Iss. 2-3. – Pp. 71-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.02.010>.
2. De Vuyst, L. The sourdough microflora: biodiversity and metabolic interactions / L. De Vuyst, P. Neysens // *Trends in Food Science & Technology*. – 2005. – V. 16, Is. 1-3. – Pp. 43-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012>.
3. Ripari, V. Evolution of sourdough microbiota in spontaneous sourdoughs started with different plant materials / V. Ripari, M. G. Gänzle, E. Berardi // *International Journal of Food Microbiology*. – 2016. – Vol. 232. – P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.025>.
4. Челябієва, В. М. Використання житньої закваски в технології кисломолочних продуктів / В. М. Челябієва, Л. В. Щерба, Т. Ю. Оляченко // *Технічні науки та технології*. – 2021. – №1 (19). – С. 280-286. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1\(19\)-280-286](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1(19)-280-286).
5. Челябієва, В. Використання заквасок спонтанного бродіння та борошна бобових культур у виробництві хліба / В. Челябієва, К. Соседова // *Технічні науки та технології*. – 2018. – № 3. – С. 251-257. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-3\(13\)-251-257](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-3(13)-251-257).
6. Gullo M. *Candida humilis* – dominant species in sourdoughs for the production of durum wheat bran flour bread / M. Gullo, A. D. Romano, A. Pulvirenti, P. Giudici // *International Journal of Food Microbiology*. – 2003. – Vol. 80, Is. 1. – Pp. 55-59. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00121-6).

7. Characterization of sourdough lactic acid bacteria based on genotypic and cell-wall protein analyses / A. Corsetti, M. De Angelis, F. Dellaglio, A. Paparella, P.F. Fox, L. Settanni, M. Gobbetti // *Journal of Applied Microbiology*. – 2003. – Vol. 94(4). – Pp. 641-654. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.01874.x>.
8. Ottogalli G. Italian bakery products obtained with sourdough: characterization of the typical microflora / G. Ottogalli, A. Galli, R. Foschino // *Advances in food sciences*. – 1996. – Vol. 18(5). – Pp. 131-144.
9. Хмелевые закваски – анализ качества и их перспектива в условиях современных предприятий [Електронний ресурс] / Т. Лебеденко, Е. Кананыхина, Т. Новичкова, Н. Соколова // *Food Science, Engineering and Technologies*. – 2010. – Vol. LVII(1). – P. 221-226. – Режим доступа: <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/1609>.
10. Membrane-bound ATPase contributes to hop resistance of *Lactobacillus brevis* / K. Sakamoto, H. W. van Veen, H. Saito, H. Kobayashi, Wil N. Konings // *Applied and environmental microbiology*. – 2002. – Vol. 68(11). – P. 5374-5378. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.68.11.5374-5378.2002>.
11. Порівняльне оцінювання компонентного складу екстрактів шишок хмелю ароматичного і гіркокого сортів [Електронний ресурс] / В. І. Воробйова, О. Е. Чигиринець, В. Г. Єфімова, Т. М. Пилипенко, І. М. Трус // *Технічні науки та технології*. – 2016. – Vol. 2(2). – С. 210-215. – Режим доступа: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/70724/65926>.
12. Antimicrobial activity of hop extracts against foodborne pathogens for meat applications / B. Krame, J. Thielmann, A. Hickisch, P. Muranyi, J. Wunderlich, C. Hauser // *Journal of Applied Microbiology*. – 2015. – Vol. 118(3). – Pp. 648-657. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.12717>.
13. Milk kefir: Nutritional, microbiological and health benefits / D. Rosa, M. M. S. Dias, Ł. M. Grześkowiak, S. A. Reis, L. L. Conceição, M. do C. G. Peluzio // *Nutrition Research Reviews*. – 2007. – Vol. 30(1). – Pp. 82-96. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0954422416000275>.
14. Microbiological Exploration of Different Types of Kefir Grains / S. Plessas, C. Nouska, I. Mantzourani, Y. Kourkoutas, A. Alexopoulos, E. Bezirtzoglou // *Fermentation*. – 2017. – Vol. 3(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation3010001>.

References

1. Lattanzi, A., Minervini, F., Di Cagno, R., Diviccaro, A., Antonielli, L., Cardinali, G., Cappelle, G. Angelis, M. De., Gobbetti, M. (2013). The lactic acid bacteria and yeast microbiota of eighteen sourdoughs used for the manufacture of traditional Italian sweet leavened baked goods. *International Journal of Food Microbiology*, 163(2–3), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.02.010>.
2. De Vuyst, L., Neysens, P. (2005). The sourdough microflora: biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science & Technology*, 16(1–3), 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012>.
3. Ripari, V., Gänzle, M. G., Berardi, E. (2016). Evolution of sourdough microbiota in spontaneous sourdoughs started with different plant materials. *International journal of food microbiology*, 232, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.025>.
4. Cheliabiieva, V. M., Shcherba, L. V., Oliachenko, T. Yu. (2020). Vykorystannia zhytnoi zakvasky v tekhnolohii kyslomolochnykh produktiv [The use of re surdug in the technology of fermented milk products]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 1(19), 280–286. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1\(19\)-280-286](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1(19)-280-286).
5. Cheliabiieva, V., Sosedova, K. (2018). Vykorystannia zakvasok spontannoho brodinnia ta boroshna bobovykh kultur u vyrobnytsvi khliba [The use of spontaneous fermentation starters and leguminous flour in the production of bread]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (3), 251–257. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-3\(13\)-251-257](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-3(13)-251-257).
6. Gullo, M., Romano, A. D., Pulvirenti, A., Giudici, P. (2003). *Candida humilis* – dominant species in sourdoughs for the production of durum wheat bran flour bread. *International journal of food microbiology*, 80(1), 55–59. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00121-6).
7. Corsetti, A., De Angelis, M., Dellaglio, F., Paparella, A., Fox, P. F., Settanni, L., Gobbetti, M. (2003). Characterization of sourdough lactic acid bacteria based on genotypic and cell-wall protein analyses. *Journal of Applied Microbiology*, 94(4), 641–654. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.01874.x>.
8. Ottogalli, G., Galli, A., Foschino, R. (1996). Italian bakery products obtained with sourdough: characterization of the typical microflora. *Advances in food sciences*, 18(5), 131–144.
9. Lebedenko T., Kananykhina E., Novichkova T., Sokolova N. (2010) Khmelevye zakvaski – analiz kachestva i ikh perspektiva v usloviakh sovremennykh predpriatii [Hop starters – quality analysis and their prospects in the conditions of modern enterprises]. *Food Science, Engineering and Technologies*, 15–16 October, Plovdiv, LVII(1), 221–226. <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/1609>.

10. Sakamoto, K., Van Veen, H. W., Saito, H., Kobayashi, H., Konings, W. N. (2002). Membrane-bound ATPase contributes to hop resistance of *Lactobacillus brevis*. *Applied and environmental microbiology*, 68(11), 5374–5378. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.11.5374-5378.2002>.
11. Vorobiova, V. I., Chyhyrynets, O. E., Yefimova, V. H., Pylypenko, T. M., Trus, I. M. (2015). Porivnialne otsiniuvania komponentnoho skladu ekstraktiv shyshok khmeliu aromatychnoho i hirkoho sortiv [Comparative evaluation of the component composition of hop cone extracts of aromatic and bitter varieties]. *Technical sciences and technologies*, 2(2), 210–215. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/70724/65926>.
12. Kramer, B., Thielmann, J., Hickisch, A., Muranyi, P., Wunderlich, J., Hauser, C. (2015). Anti-microbial activity of hop extracts against foodborne pathogens for meat applications. *Journal of Applied Microbiology*, 118(3), 648–657. <https://doi.org/10.1111/jam.12717>.
13. Rosa, D., Dias, M., Grześkowiak, Ł, Reis, S., Conceição, L., Peluzio, M. (2017). Milk kefir: Nutritional, microbiological and health benefits. *Nutrition Research Reviews*, 30(1), 82–96. <https://doi:10.1017/S0954422416000275>.
14. Plessas, S., Nouska, C. Mantzourani, I. Kourkoutas, Y., Alexopoulos, A. Bezirtzoglou, E. (2017). Microbiological Exploration of Different Types of Kefir Grains. *Fermentation*, 3(1). <https://doi.org/10.3390/fermentation3010001>.

Отримано 01.02.2024

UDC 664+663.1

Viktoriiia Cheliabiieva¹, Nataliia Buialska², Natalia Berezkina³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Food Technology and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vika.chl@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5364-4633>. **ResearcherID:** [AAA-3194-2020](https://orcid.org/AAA-3194-2020)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Technology and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: buialska@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604>. **ResearcherID:** [G-2935-2014](https://orcid.org/G-2935-2014)

³Senior Lecturer of the Department of Food Technology and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: galenko94@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0000-0952-5557>

MICROFLORA OF FLOUR AS A STARTER OF FERMENTATION PROCESSES IN FOOD TECHNOLOGIES

The study of microorganisms used in the food industry is necessary to improve the quality of food products. The complex nature of the relationships between members of associations of these microorganisms and the influence of endogenous factors on them should be taken into account in the production of appropriate food products.

The impact of endogenous factors on microorganisms used in the food industry determines the composition of their associations, which in turn determines the quality of the resulting product. Therefore, analysis of the formation of such associations is a necessary element of food technology.

An analysis of studies and publications has shown that today the issues related to the formation of microorganism associations used to ensure fermentation processes in food technology have been given insufficient attention in the scientific literature.

The purpose of the article is to study the formation of the component composition of lactic acid bacteria and yeasts of different starter cultures depending on the endogenous factors for the differentiation of fermentation products.

The formation of microorganism associations in different starter cultures has been studied. In order to conduct research, different types of starter cultures were used to prepare rye-wheat bread, beer, and fermented milk products. The taxonomic composition of the associations of the studied starter cultures was analyzed. Endogenous factors that are the main cause of differences in the composition of microorganism associations in different starter cultures have been studied. The significance of the synergism between lactic acid bacteria and yeast for the inhibition of bacteria harmful in food production has been determined.

It has been shown that the formation of the composition of microorganisms, first of all, depends on the technology of the starter preparation, its type and the chemical composition of the fermentation substrate. The organoleptic characteristics of the resulting food products were corresponded to the composition of the association of microorganisms of the starter culture that was used. The results obtained show that flour starters can be used to start the fermentation process of sugar-rich substrates.

Keywords: flour; starter culture; hops; lactic acid bacteria; yeast; fermented milk products.

Fig.: 4. **References.:** 14.

Тетяна Філінська¹, Антоніна Філінська²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: f111nskaya@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

²старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: antoniyafilin@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

РЕЦЕПТУРНІ ІННОВАЦІЇ ЯК СКЛАДОВІ ТРАНСФОРМАЦІЇ РИНКУ МАЙОНЕЗНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Продовольчі системи, які є складовою безпеки держави, особливо у воєнний і повоєнний період, потребуватимуть трансформаційних змін. Майонези й майонезні соуси належать до харчових продуктів масового споживання і основними шляхами до позитивної динаміки їх виробництва в Україні аналітики вбачають розширення асортименту завдяки впровадженню рецептурних інновацій. Майонезна продукція використовується при виготовленні різноманітних страв, що подаються в закладах харчування, а також у широкому асортименті представлена в торговельних мережах. Виробники докладають зусиль для створення дієтичних і ароматизованих майонезних продуктів, надаючи їм смаку сиру, барбекю та ін. На ринку домінує неароматизований майонез, оскільки він є більш затребуваним. Поширення веганства і вегетаріанської дієти спонукає до виробництва органічних і безяєчних продуктів. Представлена в статті інформація має оглядовий характер і містить аналіз наявних напрямів виготовлення нових видів майонезних продуктів та пошук шляхів реалізації рецептурних інновацій на промислових підприємствах та в закладах харчування з урахуванням світових тенденцій розвитку харчової галузі. Створення інноваційних майонезних соусів здійснюється за рахунок вилучення окремих рецептурних компонентів; заміни одних складових на інші; додаткового введення добавок функціонального призначення для збагачення вітамінами, мінералами, харчовими волокнами; використання олійних сумішей зі збалансованим жирнокислотним складом та ін. Практичне впровадження рецептурних інновацій на підприємствах галузі потребує тісної співпраці науковців і виробників майонезної продукції, використання цифрових технологій, штучного інтелекту, урахування змін у нормативних документах, які регулюють питання безпечності продукції, управління відходами та ін.

Ключові слова: майонезна продукція; рецептурні компоненти; інновації; функціональні добавки.

Бібл.: 59.

Актуальність теми дослідження. Ринок харчових продуктів є гнучкою системою, що постійно піддається дії зовнішніх чинників, таких як: кліматичні умови, пандемії, війни. Він має враховувати зміни в уподобаннях споживачів і залежить від суміжних галузей та організації логістичних ланцюгів, наповненості й різноманіття сировинних ресурсів. Війна призвела до суттєвого порушення продовольчої системи як в Україні, так і в інших залежних від нашої сировини країнах. Питання відродження економіки значною мірою потребуватимуть і розроблення ефективних заходів щодо трансформації продовольчих систем, які були окреслені ще до війни Указом президента № 41 від 7 лютого 2022 року. Серед пріоритетних напрямів здорове й доступне харчування, якість та безпечність продуктів, стійкі до ринкових коливань і дружні до довкілля виробництва. Впровадження в харчовій галузі інновацій має враховувати весь комплекс поставлених завдань [1; 2].

На Українському ринку майонезів не спостерігається інтенсивного зростання, але він має сталу динаміку щодо розширення асортименту продукції, яка відрізняється за калорійністю, складом, смаковими властивостями та функціональним призначенням. Основними шляхами до позитивної динаміки виробництва майонезу в Україні аналітики вбачають розширення асортименту завдяки впровадженню інновацій, підвищення безпечності та якості майонезів при використанні компонентів натурального походження [3].

Постановка проблеми. Ринок майонезної продукції суттєво змінився за останні десятиліття. Маємо значне розширення асортименту за рахунок дієтичних, вегетаріанських, збагачених нутрієнтами майонезних соусів і виготовлення продуктів зі спеціальними смаковими та ароматичними добавками й наповнювачами [4]. Серед рецептурних компонентів з'явилася велика кількість функціональних добавок (у тому числі й комплексної дії), що потребує їх систематизації, вивчення властивостей та взаємодії з іншими

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

компонентами, а також дослідження питань їхнього впливу на якість та безпечність отримуваних продуктів. Нагальним є формування комплексного підходу до практичної реалізації інноваційних рецептурних пропозицій у виробництво з урахуванням передових світових тенденцій і трансформаційних змін харчового ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційний майонез, який готується змішуванням яєць, оцту й гірчиці з наступним повільним додаванням олії, найчастіше є продуктом приготування в закладах харчування або ж у домашніх умовах. Промислові підприємства з виготовлення майонезної продукції впроваджують у виробництво інновації, що спрямовані як на розширення асортименту (продуктові, або рецептурні інновації), так і на вдосконалення технології (процесні інновації). Майонезна продукція, яка надходить до торговельних мереж, має бути не лише смачною, поживною, різноманітною, а також якісною та безпечною.

Майонези являють собою емульсії, у яких жирова фаза у дрібнодисперсному стані розподілена у водному дисперсному середовищі. Стійкість емульсії забезпечують емульгатори. Вони мають дифільну будову молекул, можуть бути природного походження і штучно виготовленими. Емульгуючі властивості виявляють фосфоліпіди тваринного (присутні в яєчному жовтку) або рослинного (побічні продукти рафінації рослинних олій) походження. Це велика група лецитинів (E322), які додатково піддають спеціальному обробленню з метою надання їм відкоригованих властивостей. Як емульгатори використовують лецитини: знежирені, ацетильовані, гідролізовані, фракціоновані та ін.

Виготовлення низькожирних майонезних соусів належної консистенції можливе за умови додавання спеціальних добавок – згущувачів та стабілізаторів. Такими функціональними добавками можуть бути продукти як штучного походження, так і нативні, або модифіковані (крохмалі, пектини та ін.) [5]. До рецептурного складу майонезів вводять такі харчові E-добавки, як альгінат натрію (E401), гуарова камедь (E412), ксантанова камедь (E415) та ін., а також їх суміші [6; 7]. Як згущувачі використовують також білкові ізоляти, отримувані з рослинної сировини (сої, квасолі, нуту) і різні види борошна [4; 8]. У ролі функціональних компонентів до рецептури низькожирних майонезів також додають різноманітні порошки, отримувані з овочів і фруктів [9-12].

Результати досліджень і публікацій останніх років підтверджують ефективність застосування борошна у виробництві низькожирних майонезів і майонезних соусів. Як природні стабілізатори в технології емульсійних продуктів пропонують використовувати вівсяне й перлове борошно [13; 14]. Горохове борошно доцільно вводити до рецептури майонезної продукції і в ролі згущувача, і як додаткове джерело білка [15]. Компонентами низькожирних дієтичних емульсійних продуктів є: рисове борошно [16], гарбузове [17] і борошно поранг (Porang) [18]. Останнє, маловідоме нам борошно отримують з рослини *Amorphophallus muelleri*, яка в деяких районах Яви відома як *iles-iles*. Рецептурними складовими майонезів слугують такі види борошна, як арахісове, кунжутне й соєве [4]. Розробники технології виготовлення низькокалорійних соусів пропонують до використання у їхньому складі борошна амаранту, зародків пшениці й аглютенного борошна з черемхи [19]. Висока здатність утримувати вологу притаманна кокосовому борошну, що робить його ефективним згущувачем низькокалорійних десертних майонезних продуктів [20; 21].

Традиційно жировою складовою майонезів виступають рослинні олії, найчастіше – соняшникова. З метою збагачення харчових водно-жирових емульсійних продуктів незамінними ω -6 і ω -3 жирними кислотами використовують збалансовані за жирнокислотним складом купажі різних олій, таких як: ріпакова і соєва [22], кукурудзяна і оливкова [23]. До рецептур майонезної продукції додають лляну, кунжутну, конопляну олію [24; 25] та ін. Їх перелік постійно збільшується за рахунок використання нетрадиційних тропічних олій, наприклад, кокосової або «червоної» пальмової олії [26; 27].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Олії, присутні в майонезній продукції в значних кількостях, потребують використання антиоксидантів. Для запобігання псуванню майонезної продукції по жировій фазі в результаті протікання окислювальних процесів використовують синтетичні харчові добавки: аскорбілпальмітат (E304), бутилгідроксіанізол (E320), бутилгідроксітолуол (E321) та ін., які несуть потенційні ризики для здоров'я людини. Організації з безпечності харчових продуктів закликають до заміни хімічних інгредієнтів натуральними. Науковці, дослідники та провідні спеціалісти галузі особливу увагу приділяють вивченню окислювальної стабільності майонезів і пошуку функціональних добавок рослинного походження з антиоксидантною активністю. Такими добавками можуть слугувати: сумах, лікопін, а також водний екстракт імбиру, в якому присутні активні компоненти гінгерол і гексагідрокуркумін [28-30]. До складу майонезу зі зниженим вмістом жиру пропонують вводити комплекс ізоляту сироваткового білка й камеді насіння базиліку. Така добавка виявляє і антиоксидантну активність, і додатково забезпечує виготовлення продукту необхідної консистенції [31].

Прянощі і пряні овочі, які збагачують майонезні соуси біологічно активними речовинами, володіють антиоксидантними і бактерицидними властивостями та сприяють збільшенню термінів зберігання. Перевага таких добавок очевидна, вони нетоксичні, добре сприймаються організмом людини і майже не виявляють побічної дії [32; 33]. До рецептурного складу майонезних соусів входять також антиоксиданти токоферолі (E307, E308, E309) і бета-каротин. Останній є провітаміном А, також використовується у харчовій галузі як природний барвник (E160a). Натуральні каротиновмісні добавки до майонезних продуктів виготовляють із гарбуза й моркви, а також із плодів персикової пальми *Bactris gasipaes* [23; 34].

Майонези, як продукти з низьким рівнем рН і високим вмістом жиру, відносно стійкі до дії мікроорганізмів. Псування може відбуватися через дріжджі і плісняви; з майонезу було виділено відносно небагато інших мікроорганізмів. Зменшення калорійності майонезної продукції і відповідно збільшення водної фази потребує використання консервантів. У ролі останніх виробники найчастіше застосовують сорбінову (E200) і бензойну (E210) кислоти та їх солі (E201, E202, E211 і E212) [35]. Традиційним підкислювачем для майонезних соусів є оцтова кислота. Вона доступна, дешева та здатна надавати продукту відповідних смакових якостей. Оцтова кислота використовується у вигляді водного розчину 3–15%-вої концентрації (харчовий оцет), або 70–80%-вого розчину (оцтова есенція), вона відома як харчова добавка E260. Ця кислота має недоліки, проявляє токсичні властивості і має протипоказання щодо використання у дієтичних продуктах та негативно впливає на здоров'я людей з проблемами шлунково-кишкового тракту. У ролі альтернативних підкислювачів або їх комплексів, що спроможні підтримувати необхідне значення рН у харчовій системі пропонують фруктової кислоти – яблучну, цитринову та ін. Вони здатні підвищити стабільність, біологічну цінність майонезного продукту і зменшити токсичну дію [36; 37].

Органолептичні властивості традиційних майонезів формувалися за рахунок солі, цукру, оцту, гірчичного порошку. На сьогодні до рецептурного складу вводять різноманітні смакові і ароматичні компоненти синтетичного і натурального походження. Цукор повністю або частково замінюють на цукрозамінники і підсолоджувачі, додають фруктово-ягідні кріопорошки, екстракти пряно-ароматичних речовин, сушене овочеve пюре, різноманітні соки (наприклад, калини, журавлини, черемші або горобини) та ін. [38-42].

Не оминули сегмент майонезної продукції і світові тенденції в галузі харчування, пов'язані зі створенням широкого асортименту функціональних продуктів, які сприяють зміцненню здоров'я та зменшують ризики виникнення захворювань. На сьогодні окреслені основні проблеми і сформовані наукові підходи до вирішення питань щодо виготовлення

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

корисної майонезної продукції. Серед актуальних напрямів виробництва майонезів: з низьким вмістом холестерину; збагачених вітамінами, мікроелементами, харчовими волокнами; з функціональними добавками лікувальної і профілактичної дії. Розроблені рецептури нових видів майонезних соусів із продуктами бджільництва (бджолиним обніжжям); майонезів із канцеропротекторним ефектом з додаванням до складу бразильського горіха, токоферолів, брюссельської капусти; введення грибних порошків з печериці, шиїтаке, рейші; збагачення ізолятами білка горіхів кеш'ю; використання у рецептурному складі майонезів такої нетрадиційної сировини, як насіння чіа, малинового пюре, копченої паприки, зелені та ін. [26; 43-49]. Джерелом харчових волокон можуть слугувати різні види клітковини, отримувані з насіння льону, кунжуту, висівок гречки, оболонки насіння пшениці та ін. [50]. Олію насіння кавуна, що містить у своєму складі комплекс жиророзчинних вітамінів А, Е та F, рекомендують вводити до складу безяєчних майонезних продуктів [51].

В умовах світової продовольчої кризи актуальним є перехід на рейки економіки замкнутого циклу, яка спрямована на раціональне споживання сировинних ресурсів та впровадження безвідходних технологій. Тож, актуальним залишається використання вторинних продуктів перероблення сільськогосподарської продукції, як сировини для виробництва майонезів. Як зазначалося вище, як функціональні добавки, особливо до низькожирних майонезних соусів, використовують порошки зі шкірок бананів і кавуна, відходів перероблення винограду й цитрусових [9-12; 52-54]. Привабливим рецептурним компонентом майонезних соусів, особливо вегетаріанських, може слугувати аквафаба – рідина, яка залишається після варіння будь-яких бобів (квасолі, гороху та ін.) [55; 56].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх публікацій показав, що питанню розширення асортименту майонезної продукції за рахунок рецептурних інновацій приділяється значна увага. Виконуються наукові роботи, які спрямовані на пошук нових функціональних добавок і створення продукції зі збалансованим жирнокислотним складом, збагаченої вітамінами, мікроелементами, харчовими волокнами та з покращеними органолептичними характеристиками. Вивчається можливість використання відходів харчових виробництв, як вторинних сировинних ресурсів, у виготовленні майонезних соусів. При цьому значна кількість отриманих результатів досліджень не знаходить практичної реалізації безпосередньо у виробництві, що потребує пошуку нового підходу до забезпечення повного циклу створення інноваційного майонезного продукту.

Метою статті є аналіз існуючих напрямків створення нових видів майонезних продуктів і пошук шляхів реалізації рецептурних інновацій на промислових підприємствах та в закладах харчування з урахуванням сучасних тенденцій розвитку харчової галузі.

Виклад основного матеріалу. Впровадження інновацій в харчовій галузі, також і при виготовленні майонезної продукції, має свої особливості. Процес не обмежується розробленням рецептури й не лише фокусується на технології виробництва, а має також відстежувати поведінку споживачів, досліджувати їх запити і уподобання. Розуміння харчової поведінки, включаючи спосіб життя та соціокультурні впливи, має вирішальне значення для прийняття споживачами нових харчових продуктів та дає суттєві переваги виробникам-новаторам. Система Smart Food Recipe System (SFRS) – система «розумних» рецептів харчових продуктів – розроблена для розширення можливостей інновацій. Вона спроектована як сховище рецептів тайських страв для моніторингу та аналізу тенденцій з функціями пошуку та порівняння. Очікується, що SFRS зможе надати такі переваги, як розуміння та підказки, що потенційно зорієнтують на розробку майбутніх харчових продуктів [57]. Впровадження подібної системи для накопичення, оброблення і використання інформації, наприклад, по майонезній продукції, могла б зорієнтувати дослідників і промисловців щодо визначення актуальних напрямків для наукових розробок і новаторських змін на ви-

робництвах. При цьому важливо створити умови для спрощеного доступу до наукової інформації та сучасних інноваційних розробок, забезпечити отримання відомостей про те, які види майонезної продукції є найбільш затребуваними і якими групами споживачів. Не менш значущим залишається питання формування ефективної комунікації між усіма учасниками, що залучені в процес розроблення, реалізації рецептурних інновацій на виробництві та їх супроводження (правового, економічного, безпекового та ін.).

Актуальним питанням сьогодення залишається доступність, якість і безпечність харчових продуктів. Впровадження системи НАССР, посилення контролю за дотриманням вимог щодо інформування споживачів про склад, властивості і присутні потенційно небезпечні компоненти в харчових продуктах значною мірою спростують пошук покупцями здорової їжі. Але використання багатокомпонентних функціональних добавок (стабілізаційні системи Стабілекс, Хамульсіон та ін.) у складі майонезних продуктів можуть обмежувати доступ покупців до повної інформації про їх склад. Якщо виробник не вказує на пакуванні тип такої комплексної добавки і не розшифровує її склад, тоді споживачу залишається лише здогадуватися про її природу. Наприклад, стабілізатори STABMAYO-7001 і STABMAYO-7002 містять у своєму складі E1422, E412, E415, а компаунди для виробництва майонезів Колаген Про 6630 і Колаген Про 6620 являють собою поєднання гідроколоїдної і білкової складових [41; 49; 58; 59].

Особливого підходу потребують майонезні продукти для окремих груп споживачів, які мають надзвичайну чутливість до глютену, неперонисимість лактози або хворіють на цукровий діабет. З теоретичного погляду, глікемічний індекс майонезу має вважатися нульовим – в оригінальному рецепті соусу немає вуглеводів. Класичні інгредієнти – це яєчний жовток, рослинна олія, оцет, лимонний сік і можливо невелика кількість спецій (у вигляді сушених трав). Але при виготовленні низькокалорійної майонезної продукції за рахунок зменшення частки жиру виробники для створення належної текстури продукту додають до нього мальтодекстрин або інші складні крохмалі, що може збільшувати глікемічний індекс до 60 одиниць. Окремі види борошна, які входять до рецептури майонезних соусів як згущувачі, можуть слугувати джерелом глютену. Необхідно враховувати і взаємний вплив складових компонентів та не допускати використання несумісних вітамінів, мікроелементів та ін. Недопустимо вводити в оману споживачів, не надаючи максимально повної інформації про склад і безпечність майонезу. Використання відходів або побічних продуктів харчових виробництв, як сировини у складі майонезної продукції, потребує ретельного дослідження їх властивостей, вивчення можливого впливу на інші рецептурні складові та на якість і безпечність кінцевого продукту.

Висновки. На підставі викладеного матеріалу можемо зробити висновок, що основними рецептурними інноваціями у виготовленні майонезної продукції є виробництво вегетаріанської, дієтичної, низькожирної продукції з оптимальним жирнокислотним складом, зі збільшеним вмістом корисних нутрієнтів і функціональних добавок спеціального призначення.

Створення інноваційних майонезних соусів здійснюється за рахунок вилучення окремих рецептурних компонентів (наприклад, яєчних продуктів); заміни одних складових на інші (наприклад, вилучення цукру і введення синтетичних підсолоджувачів, або заміни синтетичних Е-добавок на природні аналоги); додаткового введення добавок функціонального призначення для збагачення вітамінами, мінералами, харчовими волокнами; використання олійних сумішей зі збалансованим жирнокислотним складом та ін.

Практичне впровадження рецептурних інновацій на підприємствах галузі потребує тісної співпраці науковців і виробників майонезної продукції, використання цифрових технологій, штучного інтелекту, урахування змін у нормативних документах, які регулюють питання безпечності продукції, управління відходами та ін. Виготовлення і надходження на ринок інноваційної майонезної продукції має супроводжуватися наданням повної інформації про склад і властивості товару, а також враховувати запити всіх груп споживачів, досліджуючи їхню реакцію і ступінь сприйняття нових продуктів.

Список використаних джерел

1. Яцун, Л. М. Напрями повоєнного відродження та трансформації до сталого розвитку продовольчих систем [Електронний ресурс] / Л. М. Яцун // Управління розвитком соціально-економічних систем : матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 20-21 квіт. 2023 р.). – Харків : ДБТУ, 2023. – С. 66-69. – Режим доступу: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/32220>.
2. Питання національних пріоритетів трансформації продовольчих систем в Україні [Електронний ресурс] : Указ Президента України 07.02.2022 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/41/2022#Text>.
3. Божко, Т. Ринок соусної продукції: детермінанти розвитку в Україні / Т. Божко, Р. Дончевська, Н. Шаповалова // Товари і ринки. – 2019. – № 4(32) – С. 26-39. DOI: [https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019\(32\)03](https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019(32)03).
4. Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products / R. C. F. deMenezes, Q. C. de Carvalho Gomes, B. S. deAlmeida, M. F. R. deMatos, L. C. Pinto. // International Journal of Gastronomy and Food Science. – 2022. – Vol. 30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100599>.
5. Bajaj, R. Properties of octenyl succinic anhydride (OSA) modified starches and their application in low fat mayonnaise / R. Bajaj, N. Singh, A. Kaur // International Journal of Biological Macromolecules. – 2019. – Vol. 131. – P. 147-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.054>.
6. Чорна, Т. О. Товарознавче експертне дослідження якості та безпечності майонезів низькокалорійних представлених на споживчому ринку України [Електронний ресурс] / Т. О. Чорна, В. В. Бондаренко. – Режим доступу: <https://sworld.com.ua/simpoz7/51.pdf>.
7. Філінська, Т. Г. Харчові полісахариди. Виробництво, властивості, використання : навч. посіб. / Т. Г. Філінська, О. В. Черкасов, А. О. Філінська. – Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2017. – 253 с.
8. Дударев, І. М. Стратегії удосконалення майонезного соусу / І. М. Дударев, О. В. Кузьмін // Товарознавчий вісник. – 2022. – № 2(15). – С. 5-21. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2022-16-1>.
9. Дослідження технологічних властивостей порошку шкірки винограду як функціонального інгредієнту майонезного соусу / В. В. Анан'єва, А. П. Белінська, Л. В. Кричківська, С. О. Петров, І. А. Петрова // Технологічний аудит та резерви виробництва – 2016. – № 6 (3(32)). – С. 36-41. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86540>.
10. The use of watermelon rind flour as stabilizer for reduced fat mayonnaise / H. Evanuarini, D. Amertaningtyas, D. Utama, A. Safitri // Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak. – 2020. – Vol. 15, № 3. – P. 172-182. DOI: <https://doi.org/10.21776/ub.jitek.2020.015.03.5>.
11. Evanuarini, H. The Quality of Low Fat Mayonnaise Using Banana Peel Flour as Stabilizer / H. Evanuarini, A Susilo // IOP Conference Series Earth and Environmental Science, June 2020. – Vol. 478(1). – 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/478/1/012091.
12. Інноваційні технології каратиновмісних харчових продуктів / Л. М. Хомічак, Ж. О. Петрова, І. В. Кузнецова, Т. В. Шейко, М. А. Ярмолюк // Стратегія якості в промисловості і освіті : XIV Міжнар. конф. (м. Варна, Болгарія 4-7 черв., 2018 р.). – Варна, 2018. – Т.1. – С. 130-134.
13. Чоні, І. В. Використання природних стабілізаторів у технології емульсійної продукції [Електронний ресурс] / І. В. Чоні, Т. Ю. Суткович // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. – 2015. – № 1(73). – С. 54-59. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuetn_2015_1_8.
14. Чоні, І. В. Розробка нової емульсійної продукції на основі рослинної сировини / І. В. Чоні, Н. П. Коваленко [Електронний ресурс] // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. – 2008. – № 1. – С. 108-111. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuetn_2008_1_24.
15. Романовська, Т. Властивості майонезу, збагаченого білком / Т. Романовська, Н. Романовський // Науковий вісник Міжнародної асоціації науковців. Серія: Економіка, управління, безпека, технології. – 2022. – № 1(3). DOI: <https://doi.org/10.56197/2786-5827/2022-1-3-8>.
16. Дзюба, Н. А. Сенсорний аналіз як основа для створення нових дієтичних соусів / Н. А. Дзюба, В. С. Степанова // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2022. – № (5). – С. 45-55. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.6>.
17. Nidhal, H. A. Characteristics of reduced fat mayonnaise using pumpkin flour (*Cucurbita moschata*) as fat replacer / H. A. Nidhal, H. Evanuarini, I. Thohari // Environmentally Sustainable Animal Industry : International conference. 2nd 2021. – Malang, Indonesia, 2021. – Pp. 335-338. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233500017>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

18. Characteristic of Low Fat Mayonnaise Containing Porang Flour as Stabilizer / H. Evanuarini, N. Herly, Indratiningsih, P. Hastuti // *Pakistan Journal of Nutrition*. – 2015. – № 14. – Pp. 392-395. DOI: 10.3923/pjn.2015.392.395
19. Theoretical preconditions of development technology souss with reduced calority / O. Nemirich, G. Lyavinets, V. Vinnikov, V. Mikhaïlenko // *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*. – 2018. – № 20(85). – Pp. 90-94. DOI: <https://doi.org/10.15421/nv1vet8517>.
20. Дослідження властивостей багатокomпонентних сумішей борошна / Т. Філінська, В. Шевченко, А. Філінська, С. Павлюк, І. Суха // *Технічні науки та технології*. – 2023. – № 1 (31). – С. 117-125. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1\(31\)-117-125](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-117-125).
21. Філінська, Т. Дослідження властивостей функціональних добавок рослинного походження для майонезної продукції / Т. Філінська, А. Філінська, С. Павлюк // *Технічні науки та технології*. – 2023. – № 2 (32). – С. 282-288. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-282-288](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-282-288).
22. Матвєєва, Т. В. Розробка рецептури майонезу на основі купажованих олій для функціонального харчування / Т. В. Матвєєва // *Вісник Національного технологічного університету "ХПІ". Серія : Нові рішення в сучасних технологіях*. – 2015. – № 14 (1123). – С. 55-59.
23. Грищенко, І. Інноваційні технології соусу майонез / І. Грищенко, Н. Кравчук, О. Зборовська // *Ресторанний і готельний консалтинг. Інновації*. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 248-259. DOI: 10.31866/2616-7468.2.2.2019.188209.
24. Використання конопляної олії у технології майонезу / Н. А. Сова, М. В. Луценко, А. О. Лобанова, Н. В. Грекова // *Вісник Національного технологічного університету «ХПІ». Серія : Нові рішення в сучасних технологіях*. – 2019. – № 5 (1330). – С. 152-159. DOI: 10.20998/2413-4295.2019.05.20.
25. Дослідження показників якості та безпечності майонезу на основі конопляної олії / А. Геліх, В. Применко, О. Василенко, І. Приходько // *Ресторанний і готельний консалтинг. Інновації*. – 2021. – Т. 4, № 2. – С. 345-360. DOI: 10.31866/2616-7468.4.2.2021.249104.
26. Egg-free low-fat mayonnaise from virgin coconut oil / N. K. Mohammed, H. Ragavan, N. H. Ahmad, A. S. M. Hussin // *Foods and Raw Materials*. – 2022. – Pp. 76-85.
27. Галух, Б. І. Збагачення майонезів і соусів комплексом природних антиоксидантів і біологічно активних речовин / Б. І. Галух, М. З. Паска, У. Р. Драчук // *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. С. З. Гжицького*. – 2015. – Т. 17, № 1 (61), Ч. 4. – С. 11-16.
28. Lipid oxidation in mayonnaise and the role of natural antioxidants: A review / S. G. Gorji, H. E. Smyth, M. Sharma, M. Fitzgerald // *Trends in Food Science & Technology*. – 2016. – Vol. 56. – Pp. 88-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.08.002>.
29. Shelf Life Enhancement of Butter, Ice-Cream, and Mayonnaise by Addition of Lycopene / D. Kaur, A. A. Wani, D. P. Singh, D. S. Sogi // *International Journal of Food Properties*. – 2011. – Vol. 14, Is. 6. – Pp. 1217-1231. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942911003637335>.
30. Kishk, Y. F. M. Effect of ginger powder on the mayonnaise oxidative stability, rheological measurements, and sensory characteristics. / Y. F. M. Kishk, H. E. Elsheshetawy // *Annals of Agricultural Sciences*. – 2013. – Vol. 58, Is. 2. – Pp. 213-220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aos.2013.07.016>.
31. Effect of The Addition of Whey Protein-Basil Seed Gum on The Quality, Properties, and Antioxidant Activities of Low-Fat Mayonnaise / Y.-s. Kim, S. Y. Kim, Hyeon bin O, P. Lee // *Progress in Nutrition*. – 2021. – Vol. 23, № 1. – e2021022. DOI: <https://doi.org/10.23751/pn.v23i1.8791>.
32. Технологія соусів емульсійного типу підвищеної харчової цінності / Г. М. Лявинець, А. В. Гавриш, О. В. Неміріч, Л. Ю. Арсєнєва // *Наука та інновації*. – 2013. – Т. 9, № 6. – С. 15-19.
33. Скирда, О. Є. Товарознавчі аспекти якості майонезів та практичні підходи до надання їм антиоксидантних властивостей / О. Є. Скирда, Н. І. Черевична, Л. Є. Мамченко // *Молодий вчений*. – 2016. – № 3 (30). – С. 272-277.
34. Mayonnaise as a model food for improving the bioaccessibility of carotenoids from *Bactris gasipaes* fruits / L. M. de S. Mesquita, B. V. Neves, L. P. Pisani, V. V. de Rosso // *LWT* – 2020. – Vol. 122. – 109022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109022>.
35. Evaluation of Sodium Benzoate and Potassium Sorbate Preservative Concentrations in Different Sauce Samples in Urmia, Iran / N. Yazdanfar, L. Manafi, B. Ebrahiminejad, Y. Mazaheri, P. Sadighara, B. Basaran, S. Mohamadi // *Journal of Food Protection*. – 2023. – Vol. 86, Is. 8. – 100118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100118>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

36. Depreeab, J. A. Physical and flavour stability of mayonnaise / Depreeab, G. P. Savage // *Trends in Food Science & Technology* – 2001. – Vol. 12, Is. 5-6. – Pp. 157-163. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00079-6).
37. Розробка комплексного підкислювача для емульсійної продукції оздоровчого призначення / В. В. Анан'єва, Л. В. Кричківська, О. О. Варанкіна, А. П. Белінська, В. С. Якушко // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2016. – № 5/3(31). – С. 53-58. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.80474>.
38. Розробка технології наноекстрактів та нанопорошків із прянощів для оздоровчих продуктів / Р. Ю. Павлюк, В. В. Погарська, Л. О. Радченко, О. О. Юр'єва, Г. Е. Гансанова, Т. С. Абрамова, Т. М. Коломієць // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. – № 3/10(75). – С. 54-59. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43323>.
39. Юрченко, С. О. Дослідження властивостей соку журавлини як консерванта в рецептурах майонезів / С. О. Юрченко, В. І. Бабенко, В. О. Бахмач // *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. – 2019. – Т. 30 (69), Ч. 2, № 6. – С. 69-73. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/13>.
40. Бабенко, В. І. Визначення якісних показників майонезу із соком калини та оптимізація рецептури / В. І. Бабенко, В. О. Бахмач // *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. – 2021. – № 26. – С. 24-30. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-26-03>.
41. Вишнівецька, І. Вдосконалення емульсійних соусів з використанням спецій / І. Вишнівецька, В. О. Бахмач // *Перспективи розвитку м'ясної, молочної та олієжирової галузей у контексті євроінтеграції : П'ята міжнар. наук.-тех. конф. (м. Київ, 7-8 листопада 2016 р.)*. – Київ : НУХТ, 2016. – С. 184-186.
42. Поросюк, О. Використання природних антиоксидантів - соків черемші та горобини в технології майонезів / О. Поросюк, В. І. Бабенко // *Перспективи розвитку м'ясної, молочної та олієжирової галузей у контексті євроінтеграції : П'ята міжнар. наук.-тех. конф. (м. Київ, 7-8 листопада 2016 р.)*. – Київ : НУХТ, 2016. – С. 195-196.
43. Mirzanajafi-Zanjani, M. Challenges and approaches for production of a healthy and functional mayonnaise sauce / M. Mirzanajafi-Zanjani, M. Yousefi, A. Ehsani // *Food Science & Nutrition* – 2019. – Vol. 7, Issues 8. – Pp. 2471-2484. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.1132>.
44. Low-cholesterol-low-fat mayonnaise prepared from soybean oil body as a substitute for egg yolk: The effect of substitution ratio on physicochemical properties and sensory evaluation / Wan Wang, Chuanbing Hu, Hong Sun, Jiale Zhao, Cong Xu, Yue Ma, Jiage Ma, Lianzhou Jiang, Juncai Hou, Zhanmei Jiang // *LWT*. – 2022. – Vol. 167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113867>.
45. Nikzade, V. Optimization of low-cholesterol-low-fat mayonnaise formulation: Effect of using soy milk and some stabilizer by a mixture design approach / V. Nikzade, T. M. Mazaheri, M. Saadatmand-Tarzjan // *Food Hydrocolloids*. – 2012. – Vol. 28, Is. 2. – Pp. 344-352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.023>.
46. Кравченко, М. Ф. Розробка технології та комплексна оцінка якості емульсійного соусу грибного / М. Ф. Кравченко, І. А. Кублінська // *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2018. – Т. 29 (68), Ч. 3, № 5. – С. 26-32.
47. Вовк, В. В. Перспективи створення нових видів майонезних продуктів, збагачених продуктами бджільництва / В. В. Вовк, М. З. Паска // *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. С. З. Гжицького*. – 2016. – Т. 18, № 2 (68). – С. 27-31.
48. Применко, В. Г. Перспективні технології соусів із канцеропротекторним ефектом / В. Г. Применко, К. А. Сефіханова, А. М. Білецька // *Сучасні технології харчових виробництв : III Міжнар. конф. студ. та аспір. (м. Дніпро, 14-15 травня 2020 р.)*. – Дніпро, 2020. – С. 5-10.
49. Peshuk, L. V. Quality management in the technology of mayonnaise sauces with non traditional raw materials / L. V. Peshuk, V. A. Bakhmach, I. I. Simonova // *Journal of Chemistry and Technologies*. – 2022. – Vol. 30(2). – Pp. 253-264. DOI: <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.258185>.
50. Філінська, Т. Г. Функціональні добавки рослинного походження у виробництві майонезної продукції / Т. Г. Філінська, Є. А. Бей, А. О. Філінська // *Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів ТАСХ-2023 : II Міжнар. наук. конф. (м. Дніпро 20 травня 2023 р.)*. – Дніпро, 2023. – С. 80-83.
51. Sobirova, M. Research on the production of mayonnaise product enriched with biologically active compounds. Horizon [Electronic resource] / M. Sobirova, S. Muzaffarov // *Journal of Humanity and Artificial Intelligence*. – 2023. – № 2(5). – Pp. 60-62. – Access mode: <https://univerpubl.com/index.php/horizon/article/view/1363>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

52 Citrus fiber for the stabilization of O/W emulsion through combination of Pickering effect and fiber-based network / Jun-ru Qi, Li-wen Song, Wei-qi Zeng, Jin-song Liao // Food Chemistry. – 2021. – Vol. 343. – 128523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128523>.

53. Chatsisvili N. T. Physicochemical properties of a dressing-type o/w emulsion as influenced by orange pulp fiber incorporation / Nino T. Chatsisvili, Ioannis Amvrosiadis, Vassilis Kiosseoglou // LWT Food Science and Technology. – 2012. – Vol. 46, Is. 1. – Pp. 335-340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.08.019>.

54. Emulsifying and stabilizing properties of functionalized orange pulp fibers / J. Wallecan, C. McCrae, S. J. J. Debon, J. Dong, J. Mazoyer // Food Hydrocolloids. – 2015. – Vol. 47. – Pp. 115-123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.009>.

55. Caponio, F. Valorization of Food Processing By-Products / F. Caponio, A. Piga, M. Poiana // Foods. – 2022. – № 11(20). – 3246. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11203246>.

56. Hrabovska, O. Mayonnaise sauce based on aquafaba with encapsulated quercetin / O. Hrabovska, A. Avramenko // Commodities and markets. – 2023. – № 2 (46). – Pp. 131-147. DOI: [https://doi.org/10.31617/2.2023\(46\)11](https://doi.org/10.31617/2.2023(46)11).

57. Development of a Smart Food Recipe System to Enhance Food Innovation Opportunities / T. Phichonsatcha, D. Pentrakoon, N. Gerd Sri, A. Kanjana-Opas // Academy of Strategic Management Journal. – 2021. – Vol. 20, Is. 6S.

58. Стабілізатори для майонезу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lakta-service.com/product/stabilizatori-dlya-majonezu/>.

59. Стабілізаційні системи для виробництва майонезів та майонезних соусів [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://cpt.in.ua/ua/catalog/kompleksnye-dobavki-kollagen-pro-dlya-majoneza/>.

References

1. Yatsun, L.M. (2023). Napriamy povoiennoho vidrodzhennia ta trasformatsii do staloho rozvytku prodovolchyykh system [Directions of post-war revival and transformation towards sustainable development of food systems]. *Upravlinnia rozvytkom sotsialno-ekonomichnykh system: materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Management of the development of socio-economic systems: materials of the VII International. science and practice conf.* (pp. 66-69). DBTU. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/32220>.

2. Pytannia natsionalnykh priorytetiv transformatsii prodovolchyykh system v Ukraini [The issue of national priorities for the transformation of food systems in Ukraine], Decree of the President of Ukraine (from February 7, 2022). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/41/2022#Text>.

3. Bozhko, T., Donchevska, R., Shapovalova, N. (2019). Rynok sousnoi produktsii: determinanty rozvytku v Ukraini [Market of sauce products: determinants of development in Ukraine]. *Tovary i rynky – Goods and Marks*, 4(32), 26-39. [https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019\(32\)03](https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019(32)03).

4. DeMenezes, R. C. F., De Carvalho Gomes, Q. C., DeAlmeida, B. S., DeMatos, M. F. R., CedrazPinto, L. (2022). Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100599>.

5. Ritika Bajaj, Narpinder Singh, Amritpal Kaur. (2019). Properties of octenyl succinic anhydride (OSA) modified starches and their application in low fat mayonnaise. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.054>.

6. Chorna, T.O., Bondarenko, V.V. (n.d.). *Tovaroznavche ekspertne doslidzhennia yakosti ta bezpechnosti maioneziv nyzkokaloriinykh predstavlenykh na spozhyvchomu rynku Ukrainy [Commodity expert research on the quality and safety of low-calorie mayonnaise presented on the consumer market of Ukraine]*. <https://sworld.com.ua/simpoz7/51.pdf>.

7. Filinska, T.H., Cherkakov, O.V., Filinska, A.O. (2017). *Kharchovi polisakharydy. Vyrobnystvo, vlastyvoli, vykorystannia [Food polysaccharides. Production, properties, use]*. DVNZ UDKhTU.

8. Dudarev, I.M., Kuzmin, O.V. (2022). Stratehii udoskonalennia maioneznoho sousu [Strategies for improving mayonnaise sauce]. *Tovaroznavchyy visnyk – Commodity Bulletin*, 2(15), 5-21. <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2022-16-1>.

9. Ananieva, V.V., Bielinska, A.P., Krychkovska, L.V., Petrov, S.O., Petrova, I.A. (2016). Doslidzhennia tekhnolohichnykh vlastyvolei poroshku shkirky vynuhradu yak funktsionalnoho inhediientu maioneznoho sousu [Research of technological properties of grape skin powder as an functional ingredient of mayonnaise sauce]. *Tekhnolohichni audyt i rezervy vyrobnystva – Technology audit and production reserves*, 6(3(32)), 36–41. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86540>.

10. Evanuarini, H., Amertaningtyas, D., Utama, D., Safitri, A. (2020). The use of watermelon rind flour as stabilizer for reduced fat mayonnaise. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak*, 15(3), 172-182. <https://doi.org/10.21776/ub.jitek.2020.015.03.5>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

11. Evanuarini, H., Susilo, A. (2020). The Quality of Low Fat Mayonnaise Using Banana Peel Flour as Stabilizer. *June IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 478(1):012091. DOI 10.1088/1755-1315/478/1/012091.
12. Khomichak, L. M., Pietrova, Zh. O., Kuznietsova, I. V., Sheiko, T. V., Yarmoliuk, M. A. (2018). Innovatsiini tekhnolohii karatynovmisnykh kharchovykh produktiv [Innovative technologies of carotene-containing food products]. *Stratehiia yakosti v promyslovosti i osviti: XIV Mizhnarodna konferentsiia – Quality strategy in industry and education: XIV International. conf.* (vol. 1, pp. 130-134). Varna, Bolhariia.
13. Choni, I.V., Sutkovych, T.Yu. (2015). Vykorystannia pryrodnykh stabilizatoriv u tekhnolohii emulsiinoyi produktsii [The use of natural stabilizers in the technology of emulsion products]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli – Scientific Bulletin of the Poltava University of Economics and Trade*, 1(73), 54–59. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuetn_2015_1_8.
14. Choni, I.V., Kovalenko, N.P. (2008). Rozrobka novoi emulsiinoyi produktsii na osnovi roslynnoi syrovyny [Development of new emulsion products based on vegetable raw materials]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli – Scientific Bulletin of the Poltava University of Economics and Trade*, 1, 108–111. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuetn_2008_1_24.
15. Romanovska, T., Romanovskiy, N. (2022). Vlastyivosti maionezu, zbahachenoho bilkom [Properties of protein-enriched mayonnaise]. *Naukovyi visnyk Mizhnarodnoi asotsiatsii naukovtsiv. Seriia: ekonomika, upravlinnia, bezpeka, tekhnolohii – Scientific Bulletin of the International Association of Scientists. Series: Economy, management, security, technologies*, 1(3). <https://doi.org/10.56197/2786-5827/2022-1-3-8>.
16. Dziuba, N.A., Stepanova, V.S. (2022). Sensorni analiz yak osnova dlia stvorennia novykh diietnykh sousiv [Sensory analysis as a basis for creating new dietary sauces]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky – Tavrii Scientific Bulletin. Series: Technical sciences*, (5), 45-55. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.6>.
17. Nidhal, H. A., Evanuarini, H., Thohari, I. (2021). Characteristics of reduced fat mayonnaise using pumpkin flour (*Cucurbita moschata*) as fat replacer. *Environmentally Sustainable Animal Industry. International conference*, 335-338. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233500017>.
18. Evanuarini, H., Nurliyani, Indratningsih, Hastuti, P. (2015). Characteristic of Low Fat Mayonnaise Containing Porang Flour as Stabilizer. *Pakistan Journal of Nutrition*, 14, 392-395. DOI: 10.3923/pjn.2015.392.395.
19. Nemirich, O., Lyavinets, G., Vinnikov, V., & Mikhailenko, V. (2018). Theoretical preconditions of development technology souss with reduced calory. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 20(85), 90-94. <https://doi.org/10.15421/nvvet8517>.
20. Filinska, T., Shevchenko, V., Filinska, A., Pavliuk, S., Sukha, I. (2023). Doslidzhennia vlastyivostei bahatokomponentnykh sumishei boroshna [Study of the properties of multicomponent mixtures of flour]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 1(31), 117–125. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1\(31\)-117-125](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-117-125).
21. Filinska, T., Filinska, A., Pavliuk, S. (2023). Doslidzhennia vlastyivostei funktsionalnykh dobavok roslynnoho pokhodzhennia dlia maioneznoi produktsii [Research on the properties of functional additives of vegetable origin for mayonnaise products]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (2(32)), 282–288. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-282-288](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-282-288).
22. Matvieieva, T.V. (2015). Rozrobka retseptury maionezu na osnovi kupazhovanykh olii dlia funktsionalnoho kharchuvannia [Development of mayonnaise recipe based on blended oils for functional nutrition]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of the National technical Khpi University. New solutions in modern technologies*, 14(1123), 55-59.
23. Hryshchenko, I., Kravchuk, N., Zborovska, O. (2019). Innovatsiini tekhnolohii cousu maionez [Innovative technologies of mayonnaise sauce]. *Restoranni i hotelnyi konsaltnykh. Innovatsii – Restaurant and hotel consulting. Innovations*, 2, 248-259. DOI: 10.31866/2616-7468.2.2.2019.188209.
24. Cova, N.A., Lutsenko, M.V., Lobanova, A.O., Hrekova, N.V. (2019). Vykorystannia konoplianoi olii u tekhnolohii maionezu [Use of hemp oil in mayonnaise technology]. *Visnyk NTU «KhPI», Seriia: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of Khpi NTU, Series: New solutions in modern technologies*, 5(1330), 152-159. DOI: 10.20998/2413-4295.2019.05.20.
25. Helikh, A., Prymenko, V., Vasylenko, O., Prykhodko, I. (2021). Doslidzhennia pokaznykiv yakosti ta bezpechnosti maionezu na osnovi konoplianoi olii [Study of quality and safety indicators of mayonnaise based on hemp oil]. *Restoranni i hotelnyi konsaltnykh. Innovatsii – Restaurant and hotel consulting. Innovations*, 4(2), 345-360. DOI: 10.31866/2616-7468.4.2.2021.249104.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

26. Mohammed, N.K., Ragavan, H., Ahmad, N. H., Hussin, A. S. M. (2022). Egg-free low-fat mayonnaise from virgin coconut oil. *Journal: Foods and Raw Materials*, 76-85.
27. Halukh, B.I., Paska, M.Z., Drachuk, U.R. (2015). Zbahachennia maioneziv i sousiv kompleksom pryrodnykh antyoksydantiv i biolohichno aktyvnykh rechovyn [Enrichment of mayonnaise and sauces with a complex of natural antioxidants and biologically active substances]. *Naukovyi visnyk LNUVMBT imeni S.Z. Gzhyskoho – Scientific Bulletin of the LNUVMBT named after S.Z. Gzhitskyi*, 17, 1(61), 4, 11-16.
28. Gorji, S.G., Smyth, H.E., Sharma, M., Fitzgerald, M. (2016). Lipid oxidation in mayonnaise and the role of natural antioxidants: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.08.002>.
29. Kaur, D., Wani, A.A., Singh, D.P., Sogi, D.S. (2011). Shelf Life Enhancement of Butter, Ice-Cream, and Mayonnaise by Addition of Lycopene. *International Journal of Food Properties*, 14(6), 1217-1231. <https://doi.org/10.1080/10942911003637335>.
30. Kishk, Y. F. M., Elsheshetawy, H. E. (2013). Effect of ginger powder on the mayonnaise oxidative stability, rheological measurements, and sensory characteristics. *Annals of Agricultural Sciences*, 58(2), 213-220. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2013.07.016>.
31. Kim, Y., Kim, S.Y., O, H. b., Lee, P. (2021). Effect of The Addition of Whey Protein-Basil Seed Gum on The Quality, Properties, and Antioxidant Activities of Low-Fat Mayonnaise. *Progress in Nutrition*, 23(1), e2021022. <https://doi.org/10.23751/pn.v23i1.8791>.
32. Liavynets, H. M., Havrysh, A. V., Niemirich, O. V., Arsenieva, L. Yu. (2013). Tekhnolohiia sousiv emulsiinoho typu pidvysychenoї kharchovoї tsinnosti [Technology of emulsion-type sauces of increased nutritional value]. *Nauka ta innovatsii – Science and Innovations*, 9(6), 15-19.
33. Skyrda, O.Ie., Cherevychna, N.I., Mamchenko, L.Ie. (2016). Tovaroznavchi aspekty yakosti maioneziv ta praktychni pidkhody do nadannia yim antyoksydantnykh vlastyvostei [Merchandising aspects of the quality of mayonnaise and practical approaches to providing them with antioxidant properties]. *Molodyi vchenyi – Young Scientist*, 3(30), 272-277.
34. De Souza Mesquita, L.M., Neves, B.V., Pisani, L.P., de Rosso, V.V. (2020). Mayonnaise as a model food for improving the bioaccessibility of carotenoids from *Bactris gasipaes* fruits. *LWT*, 122, 109022. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109022>.
35. Yazdanfar, N., Manafi, L., Ebrahiminejad, B., Mazaheri, Y., Sadighara, P., Basaran, B., Mo-hamadi, S. (2023). Evaluation of Sodium Benzoate and Potassium Sorbate Preservative Concentrations in Different Sauce Samples in Urmia, Iran. *Journal of Food Protection*, 86, 8, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100118>.
36. Depree, J.A., Savage, G.P. (2001). Physical and flavour stability of mayonnaise. *Trends in Food Science & Technology*, 12(5-6), 157-163. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00079-6).
37. Ananieva, V. V., Krychkovska, L. V., Varankina, O. O., Bielinska, A. P., Yakushko, V. S. (2016). Rozrobka kompleksnoho pidkysliuvacha dlia emulsiinoї produktsii ozdorovchoho pryznachennia [Development of complex acidifier for emulsion foodstuffs for wellness purposes]. *Tekhnolohichniy audyt ta rezervy vyrobnytstva – Technological audit and reliability reserves*, 5/3(31), 53-58. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.80474>.
38. Pavliuk, R.Yu., Poharska, V.V., Radchenko, L.O., Yurieva, O.O., Hansanova, H.E., Abramova, T.S., Kolomiets, T.M. (2015). Rozrobka tekhnolohii nanoekstraktiv ta nanoporoshkiv iz prianoschiv dlia ozdorovchykh produktiv [The development of technology of nanoextracts and nanopowders from herbal spices for healthful products]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 3/10(75), 54-59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43323>.
39. Yurchenko, S.O., Babenko, V.I., Bakhmach, V.O. (2019). Doslidzhennia vlastyvostei soku zhuravlyny yak konservanta v retsepturakh maioneziv [Investigation of the properties of cranberry juice as a preservative in mayonnaise formulations]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky – Academic notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series: technical sciences*, 30(69), 2, 6, 69-73. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/13>.
40. Babenko, V.I., Bakhmach, V.O. (2021). Vyznachennia yakisnykh pokaznykiv maionezu iz sokom kalyny ta optymizatsiia retseptury [Determination of quality indicators of mayonnaise with viburnum juice and optimization of the formulation]. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Lviv University of Trade and Economics. Technical sciences*, 26, 24-30. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-26-03>.
41. Vyshnivetska, I., Bakhmach, V. O. (2016). Vdoskonalennia emulsiinykh sousiv z vykorystanniam spetsii [Improvement of emulsion sauces using spices]. *Perspektyvy rozvytku miasnoi, molochnoi*

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

ta oliiezhYROVOI haluzei u konteksti yevrointehratsii: Piata mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia – Prospects for the development of the meat, dairy and oil-fat industries in the context of European integration: Fifth International. science and technology conf. (pp. 184-186). NUKhT.

42. Porosiuk, O., Babenko, V.I. (2016). Vykorystannia pryrodnykh antyoksydantiv - sokiv cheremshi ta horobyny v tekhnolohii maoneziv [Use of natural antioxidants - cherry and mountain ash juices in mayonnaise technology]. *Perspektyvy rozvytku miasnoi, molochnoi ta oliiezhYROVOI haluzei u konteksti yevrointehratsii: Piata mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia – Prospects for the development of the meat, dairy and oil-fat industries in the context of European integration: Fifth International. science and technology conf.* (pp. 195-196). NUKhT.

43. Mirzanajafi-Zanjani, M., Yousefi, M., Ehsani, A. (2019). Challenges and approaches for production of a healthy and functional mayonnaise sauce. *Food Science & Nutrition*, 7(8), 2471-2484. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1132>.

44. Wang, W., Hu, C., Sun, H., Zhao, J., Xu, C., Ma, Y., Ma, J., Jiang, L., Hou, J., Jiang, Z. (2022). Low-cholesterol-low-fat mayonnaise prepared from soybean oil body as a substitute for egg yolk: The effect of substitution ratio on physicochemical properties and sensory evaluation. *LWT*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113867>.

45. Nikzade, V., Mazaheri, T. M., Saadatmand-Tarzan, M. (2012). Optimization of low-cholesterol-low-fat mayonnaise formulation: Effect of using soy milk and some stabilizer by a mixture design approach. *Food Hydrocolloids*, 28(2), 344-352. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.023>.

46. Kravchenko, M. F., Kublinska, I. A. (2018). Rozrobka tekhnolohii ta kompleksna otsinka yakosti emulsiinoho sousu hrybnoho [Development of technology and comprehensive evaluation of the quality of emulsion mushroom sauce]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky – Academic notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series: technical sciences*, 29(68), 3(5), 26-32.

47. Vovk, V.V., Paska, M.Z. (2016). Perspektivy stvorennia novykh vydiv maoneznykh produktiv, zbahachenykh produktamy bdzhilnytstva [Prospects for the creation of new types of mayonnaise products enriched with beekeeping products]. *Naukovyi visnyk LNUVMBT imeni S.Z. Gzhitskyi – Scientific Bulletin of the LNUVMBT named after S.Z. Gzhitskyi*, 18, 2(68), 27-31.

48. Prymenko, V.H., Sefikhanova, K.A., Biletska, A.M. (2020). Perspektivni tekhnolohii sousiv iz kantseroprotekturnym efektom [Promising technologies of sauces with a cancer-protective effect]. *Suchasni tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv: III Mizhnarodna konferentsiia studentiv ta aspirantiv – Modern technologies of food production: III International. conf. stud. and aspir.* (pp. 5-10).

49. Peshuk, L.V., Bakhmach, V.A., Simonova, I.I. (2022). Quality management in the technology of mayonnaise sauces with non traditional raw materials. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(2), 253-264. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.258185>.

50. Filinska, T.H., Biei, Ye.A., Filinska, A.O. (2023). Funktsionalni dobavky roslynnoho pokhodzhennia u vyrobnytstvi maoneznoi produktsii [Functional additives of vegetable origin in the production of mayonnaise products]. *Teoretychni ta eksperymentalni aspekty suchasnoi khimii ta materialiv TASKh-2023: II Mizhnarodna naukova konferentsiia – Theoretical and experimental aspects of modern chemistry and materials Tash-2023: II International. of science conf.* (pp. 80-83).

51. Sobirova, M., & Muzaffarov, S. (2023). Research on the production of mayonnaise product enriched with biologically active compounds. *Horizon: Journal of Humanity and Artificial Intelligence*, 2(5), 60–62. <https://univerpubl.com/index.php/horizon/article/view/1363>.

52. Qi, J., Song, L., Zeng, W., Liao, J. (2021). Citrus fiber for the stabilization of O/W emulsion through combination of Pickering effect and fiber-based network. *Food Chemistry*, 343, 128523. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128523>.

53. Chatsisvili, N.T., Amvrosiadis, I., Kiosseoglou, V. (2012). Physicochemical properties of a dressing-type o/w emulsion as influenced by orange pulp fiber incorporation. *LWT - Food Science and Technology*, 46(1), 335-340. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.08.019>.

54. Wallecan, J., McCrae, C., Debon, S.J.J., Dong, J., Mazoyer, J. (2015). Emulsifying and stabilizing properties of functionalized orange pulp fibers. *Food Hydrocolloids*, 47, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.009>.

55. Caponio, F., Piga, A., Poiana, M. (2022). Valorization of Food Processing By-Products. *Foods*, 11(20), 3246. <https://doi.org/10.3390/foods11203246>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

56. Hrabovska, O., Avramenko, A. (2023). Mayonnaise sauce based on aquafaba with encapsulated quercetin. *Commodities and markets*, 2(46), 131-147. [https://doi.org/10.31617/2.2023\(46\)11](https://doi.org/10.31617/2.2023(46)11).

57. Phichonsatcha, T., Pentrakoon, D., Gerdstri, N., Kanjana-Opas, A. (2021). Development of a Smart Food Recipe System to Enhance Food Innovation Opportunities. *Academy of Strategic Management Journal*, 20, 6S.

58. Stabilizatory dlia maionezu [Stabilizers for mayonnaise]. (n.d.). <https://lakta-service.com/product/stabilizatori-dlya-majonezu/>.

59. Stabilizatsiini systemy dlia vyrobnytstva maioneziv ta maioneznykh sousiv [Stabilization systems for the production of mayonnaise and mayonnaise sauces]. (n.d.). <https://cpt.in.ua/ua/catalog/kompleksnye-dobavki-kollagen-pro-dlya-majoneza/>.

Отримано 13.02.2024

UDC 664.346

Tetiana Filinska¹, Antonina Filinska²

¹PhD in Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers Fats and Food Products Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: fl11nskaya@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

²senior 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. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

RECIPE INNOVATIONS AS INGREDIENT TRANSFORMATIONS OF THE MAYONNAISE MARKET

Mayonnaises and mayonnaise sauces are food products for mass consumption. There is no intensive growth in the mayonnaise market, but it has a stable dynamic in terms of expanding the range of products, which differ in calorie content, composition, taste properties and functional purpose. Analysts see the main ways to the positive dynamics of mayonnaise production in Ukraine as the expansion of the assortment due to the introduction of recipe innovations, improvement of the safety and quality of mayonnaise when using components of natural origin.

The market of mayonnaise products has changed significantly over the past decades. We have a significant expansion of the assortment due to dietary, vegetarian, nutrient-enriched mayonnaise sauces and products with special flavor and aroma additives and fillers. A large number of functional additives (including complex action) appeared among the prescription components, which requires their systematization, study of properties and interaction with other components, as well as research into the issues of their influence on the quality and safety of the obtained products. It is urgent to form a comprehensive approach to the practical implementation of innovative recipe proposals in production, taking into account advanced global trends and transformational changes in the food market.

The analysis of the publications showed that considerable attention is paid to the issue of expanding the assortment of mayonnaise products due to recipe innovations. Scientific works are carried out, which are aimed at finding new functional additives and creating products with a balanced fatty acid composition, enriched with vitamins, trace elements, dietary fibers and with improved organoleptic characteristics. The possibility of using food production waste as secondary raw materials in the production of mayonnaise sauces is being studied. At the same time, a significant number of obtained research results do not find practical implementation directly in production, which requires the search for a new approach to ensuring the full cycle of creating an innovative mayonnaise product.

The information presented in the article is of an overview nature and contains an analysis of existing trends in the production of new types of mayonnaise products and the search for ways to implement recipe innovations. The creation of innovative mayonnaise sauces is carried out by extracting individual recipe components (for example, egg products); replacing one component with another (for example, removing sugar and introducing synthetic sweeteners, or replacing synthetic E-additives with natural analogues); additional introduction of functional additives for enrichment with vitamins, minerals, dietary fibers; use of oil mixtures with a balanced fatty acid composition, etc. The practical implementation of recipe innovations at enterprises of the industry requires close cooperation of scientists and manufacturers of mayonnaise products, the use of digital technologies, artificial intelligence, taking into account changes in regulatory documents that regulate issues of product safety, waste management, etc. The production and entry into the market of innovative mayonnaise products must be accompanied by the provision of complete information about the composition and properties of the product, as well as take into account the requests of all groups of consumers, studying their reaction and the degree of acceptance of new products.

Keywords: mayonnaise products; recipe components; innovations; functional additives.

References: 59.

Тетяна Філінська¹, Антоніна Філінська², Лариса Фурсова³

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: f111nskaya@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

²старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: antoniyafilin@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

³магістрант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: fursovalarisa05@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ЦИТРУСОВИХ ЯК ДОБАВОК ДЛЯ МАЙОНЕЗНИХ СОУСІВ

Зростання обсягів вирощування і перероблення цитрусових супроводжується утворенням великої кількості відходів, які містять низку корисних нутрієнтів і можуть слугувати вагомим біоресурсом для різних сфер застосування. Присутні у відходах вітаміни, мікроелементи, харчові волокна дозволяють використовувати їх як функціональні добавки. Специфічністю харчових волокон цитрусових є велика кількість протопектину, що зумовлює їхні значні сорбційні властивості. Здатність волокон утримувати воду робить їх ефективними загущувачами й привабливими компонентами низькожирних емульсійних продуктів, наприклад, майонезних соусів. У статті наведено результати дослідження властивостей порошків, отриманих із висушених шкірок грейпфрута й апельсину шляхом подрібнення і розділення на фракції просіюванням через сита різного діаметра. Визначено показники вологоутримуючої здатності для різних за розмірами фракцій висушеної та подрібненої шкірки грейпфрута й апельсину. Встановлено, що даний показник має більшу величину для найдрібнішої фракції. Для грейпфрутового порошку з розміром частинок менш як 0,50 мм вологоутримуюча здатність становить 808%, а для апельсинового – 591%. Високу здатність утримувати воду виявили і суміші грейпфрутового та апельсинового порошку при різних співвідношеннях компонентів, а також їх суміші з кокосовим борошном. Виготовлені зразки низькожирних майонезних соусів із додаванням у рецептуру індивідуальних і комплексних функціональних добавок у кількості 5%. Ефективність дії добавок перевіряли визначенням показника стійкості виготовлених емульсійних продуктів, який відповідав вимогам, що висуваються до майонезів і майонезних соусів чинним стандартом.

Ключові слова: майонезні соуси; грейпфрут; апельсин; кокосове борошно; клітковина; функціональна добавка; вологоутримуюча здатність.

Табл.: 4. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. Ринок майонезних соусів постійно поповнюється новими видами продукції – дієтичними або низькожирними; веганськими на безяєчній основі; збагаченими нутрієнтами (вітамінами, мікроелементами, харчовими волокнами), продуктами зі спеціальними смако-ароматичними добавками й наповнювачами [1]. Як багатокomпонентні продукти, майонезні соуси не перестають бути об'єктом досліджень науковців і спеціалістів харчової галузі. Вивченню властивостей нових рецептурних компонентів, їхнього впливу на показники якості кінцевого продукту приділяється значна увага.

Актуальним на сьогодні є також орієнтування виробників харчової продукції спрямовувати свої зусилля на впровадження безвідходних технологій і пошуку шляхів використання утворених в технологічному процесі відходів, як вторинних сировинних ресурсів, у різних галузях промисловості. Великий відсоток відходів (до 50%), притаманний виробництвом з перероблення цитрусових, робить їх потужним біоресурсом для різних сфер застосування [2; 3]. Тож нагальним є проведення досліджень, пов'язаних із вивченням їхніх властивостей та можливістю перероблення і повторного використання.

Постановка проблеми. Майонезні соуси це емульсійні водно-жирові продукти, основними складовими яких є водна і жирова фази та емульгатор. Проте без смако-ароматичних добавок, консервантів, антиоксидантів, стабілізаторів та інших рецептурних компонентів складно виготовити продукт, який би задовольняв вимоги споживачів. Серед функціональних добавок для низькожирної майонезної продукції вагоме місце відводиться гідроколоїдам, здатним впливати на реологічні властивості

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

водної фази й забезпечувати виготовлення продукції потрібної консистенції. Цитрусові відходи, як джерело харчових волокон, можуть бути ефективними добавками з низкою корисних технологічних властивостей, у тому числі й вологоутримуючою здатністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розширення асортименту майонезних соусів супроводжується пошуком нових рецептурних компонентів, дослідженням їх властивостей і вивченням впливу на характеристики одержуваного кінцевого продукту. Інноваційні підходи реалізуються різними шляхами, серед яких: повне вилучення окремих рецептурних складових, або часткова їх заміна; введення спеціальних технологічних добавок та збагачувальних нутрієнтів.

Запит на продукцію з низьким вмістом жиру і високою часткою водної фази потребує використання функціональних добавок, що впливають на реологічні властивості й мають високий показник вологоутримуючої здатності. Такими добавками традиційно слугують крохмалі, пектини, білкові ізоляти та ін. Пропонуються до використання комплексні загущувачі, у складі яких є борошно й рослинна клітковина [4]. Стабілізуючі властивості для низькожирних емульсій виявляють і функціональні добавки з нетрадиційної сировини, наприклад, зі шкірок банана або кавуна [5].

Серед гідролоїдів, що застосовуються у виробництві низькожирних майонезних продуктів, особливе місце займають харчові волокна цитрусових з високим показником вологоутримуючої здатності, більшим ніж у волокон з моркви і вівса. [6,7]. Порошкові продукти з апельсинової м'якоті зі збалансованим вмістом розчинних і нерозчинних харчових волокон слугують ефективними добавками в емульсійні продукти з низькою часткою жиру [8]. Описані властивості апельсинових волокон, поверхнева активність яких обумовлена присутніми пектинами (~35 %), білками (~8 %) і целюлозою (>45 %), що пояснює їхню загущувальну дію [9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх публікацій показав, що ефективними функціональними добавками, які забезпечують виробництво низькожирних майонезних соусів, є рослинні компоненти з високим вмістом клітковини. Серед них виділено порошкові продукти, отримувані з цитрусових, а саме з апельсинів. Великий відсоток відходів, що утворюються в процесі споживання і перероблення цитрусових з виготовлення соків, джемів, желе, потребує розширення об'єктів дослідження і вивчення їхніх властивостей.

Метою статті є дослідження властивостей порошку зі шкірки грейпфрута та його сумішей з іншими функціональними добавками для низькожирних майонезних соусів; визначення їх показників вологоутримуючої здатності.

Виклад основного матеріалу. Світове виробництво цитрусових незважаючи на деякі коливання знаходиться на високому рівні. У табл. 1 наведено інформацію щодо виробництва апельсинів і грейпфрутів у світі за останні п'ять років [10; 11].

Таблиця 1 – Виробництво апельсинів і грейпфрутів за останні п'ять років

Назва продукту	Виробництво, млн метричних тонн				
	2018-2019 рр.	2019-2020 рр.	2020-2021 рр.	2021-2022 рр.	2022-2023 рр.
Апельсин	54,30	41,60	48,19	50,41	47,77
Грейпфрут	6,82	6,80	6,68	6,97	6,81

Збільшення виробництва грейпфрутового соку у 2024 році очікується на рівні 5,7 %, а на найближчі роки зростання його на ринку щорічно становитиме близько 6,83 % (2023-2027) [12]. Наведена інформація вказує на прогнозоване зростання цитрусових відходів і на затребуваність, обґрунтованість та доцільність вивчення їх властивостей.

Для досліджень використовували висушену природним шляхом шкірку червоного грейпфрута з вмістом вологи 8-9 %. Її подрібноли і просіюванням через сита з отворами різного діаметра розділили на фракції. Для кожної фракції визначили насипну густину вимірюванням маси певного об'єму порошку й показник вологоутримуючої здатності методом центрифугування [13; 14]. Результати досліджень наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Вологоутримуюча здатність подрібненої шкірки грейпфрута

Розмір фракції, мм	Насипна густина, кг/м ³	Вологоутримуюча здатність, %
менше 0,50	204	808
0,50-0,65	272	750
0,65-0,80	343	708

Як видно з наведених у табл. 2 результатів, досліджені зразки мають високий показник вологоутримуючої здатності. Можна зробити висновок, що їх доцільно використовувати як загущувачі низькожирних майонезних соусів із великою часткою води. Зменшення розмірів досліджуваної фракції супроводжується збільшенням показника вологоутримуючої здатності. Ця залежність вказує на доцільність використання як ефективного загущувача саме фракції з частинками найменшого розміру. До того ж її використання не призведе до появи такого дефекту, як неоднорідність текстури майонезного соусу, що можливо при використанні фракцій більшого розміру. Високий показник вологоутримуючої здатності дозволить використовувати найдрібнішу фракцію шкірки грейпфрута у незначних кількостях, що з погляду органолептичних характеристик забезпечить виготовлення продукту з м'яким смаком і незначною гіркуватістю.

Аналогічні дослідження виконали і для фракцій, отриманих із висушених апельсинових шкірок (табл. 3).

Таблиця 3 – Вологоутримуюча здатність подрібненої шкірки апельсину

Розмір фракції, мм	Насипна густина, кг/м ³	Вологоутримуюча здатність, %
менше 0,50	271	591
0,50-0,65	329	581
0,65-0,80	444	563

Високі показники вологоутримуючої здатності зразків апельсина і грейпфруту можна пояснити значним вмістом харчових волокон (~60/100 г шкірки) [15]. Специфічністю харчових волокон цитрусових є велика кількість присутнього протопектину (24,0–28,7 %), що зумовлює їх значні сорбційні властивості [16].

Для подальших досліджень обрали найдрібніші фракції (менш як 0,50 мм) подрібненої шкірки грейпфрута (грейпфрутовий порошок) і подрібненої шкірки апельсина (апельсиновий порошок). Визначили показник вологоутримуючої здатності сумішей грейпфрутового і апельсинового порошоків, взятих у різних співвідношеннях. Результати досліджень наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Вологоутримуюча здатність суміші грейпфрутового й апельсинового порошоків

Склад суміші		Вологоутримуюча здатність, %
Компонент суміші	Вміст, %	
Грейпфрутовий порошок	100	808
Апельсиновий порошок	0	
Грейпфрутовий порошок	75	715
Апельсиновий порошок	25	
Грейпфрутовий порошок	50	634
Апельсиновий порошок	50	
Грейпфрутовий порошок	25	611
Апельсиновий порошок	75	
Грейпфрутовий порошок	0	591
Апельсиновий порошок	100	

Як видно з табл. 4 досліджувані суміші дещо відрізняються за показником вологоутримуючої здатності, але при цьому значення його досить високе. Збільшення в суміші частки грейпфрутового порошку з 25 до 75 % підвищує вологоутримуючу здатність на 17 %.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Оскільки притаманний для грейпфрутового й апельсинового порошоків помаранчевий колір різної інтенсивності може бути небажаним при виготовленні білих майонезних соусів, пропонуємо додавати біле кокосове борошно, що також характеризується високим показником вологоутримуючої здатності і є ефективним загущувачем [17]. Дослідження виконані з цитрусовим порошком (суміш 50 % грейпфрутового і 50 % апельсинового порошку), змішаним з кокосовим борошном у різних співвідношеннях. Результати наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Вологоутримуюча здатність суміші цитрусового порошку з кокосовим борошном

Склад суміші		Вологоутримуюча здатність, %
Компонент суміші	Вміст, %	
Цитрусовий порошок	100	699
Кокосове борошно	0	
Цитрусовий порошок	75	657
Кокосове борошно	25	
Цитрусовий порошок	50	608
Кокосове борошно	50	
Цитрусовий порошок	25	585
Кокосове борошно	75	
Цитрусовий порошок	0	500
Кокосове борошно	100	

Як видно з табл. 5, додавання кокосового борошна дещо зменшує здатність суміші утримувати воду, та все ж залишається на високому рівні. При цьому використання таких композицій дозволить регулювати органолептичні властивості кінцевого продукту як за кольором, так і за смаковими якостями.

Дослідні зразки низькожирних майонезних соусів виготовляли з використанням як функціональної добавки окремо взятих грейпфрутового й апельсинового порошку, їх суміші зі співвідношенням компонентів 1:1, а також суміш останніх із кокосовим борошном. Запропоновані добавки вводили до рецептурного складу в кількості 5 %, попередньо змішуючи їх з невеликою кількістю води для набрякання. Отримані зразки майонезних соусів мали приємні індивідуальні присмаки, колір від білого до кольору пряженого молока. Усі дослідні зразки низькожирних майонезних соусів за показником стійкості емульсії відповідали вимогам ДСТУ 4487:2015 Майонези та майонезні соуси. Загальні технічні умови [18].

Висновки. На підставі проведених досліджень визначені показники вологоутримуючої здатності для різних фракцій висушеної та подрібненої шкірки грейпфрута й апельсину. Встановлено, що даний показник має більшу величину для найдрібнішої фракції. Для грейпфрутового порошку з розміром частинок менше ніж 0,50 мм вологоутримуюча здатність становить 808 %, а для апельсинового – 591 %. Високу здатність утримувати воду виявили цитрусовий порошок і його суміш з кокосовим борошном. Виготовлені зразки низькожирних майонезних соусів з додаванням у рецептуру індивідуальних і комплексних функціональних добавок у кількості 5 %. Ефективність дії добавок перевіряли за показником стійкості емульсійних продуктів, який відповідав вимогам, що висуваються до майонезів і майонезних соусів чинним стандартом.

Список використаних джерел

1. Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products / R. C. F. deMenezes, Q. C. de C. Gomes, B. S. deAlmeida, M. F. R. deMatos, L. CedrazPinto. // International Journal of Gastronomy and Food Science. – 2022. – Vol. 30, December. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100599>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

2. Suri, S. Current applications of citrus fruit processing waste: A scientific outlook / S. Suri, A. Singh, P. K. Nema // *Applied Food Research*. – 2022. – Vol. 2, Is. 1, June. – 100050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100050>.
3. Current scenario and global perspectives of citrus fruit waste as a valuable resource for the development of food packaging film / P. Dubey, G. Tripathi, S. S. Mir, O. Yousuf // *Trends in Food Science & Technology*. – 2023. – Vol. 141, November. – 104190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104190>.
4. Філінська, Т. Дослідження властивостей функціональних добавок рослинного походження для майонезної продукції / Т. Філінська, А. Філінська, С. Павлюк // *Технічні науки та технології*. – 2023. – № 2 (32). – С. 282-288. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-282-288](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-282-288).
5. The use of watermelon rind flour as stabilizer for reduced fat mayonnaise / H. Evanuarini, D. Amertaningtyas, D. Utama, A. Safitri // *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak*. – 2020. – Vol. 15, № 3. – Pp. 172-182. DOI: <https://doi.org/10.21776/ub.jitek.2020.015.03.5>.
6. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. Eric Dickinson // *Food Hydrocolloids*. – 2009. – Vol. 23, Issue 6, August. – Pp. 1473-1482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005>.
7. Citrus fiber for the stabilization of O/W emulsion through combination of Pickering effect and fiber-based network / Jun-ru Qi, Li-wen Song, Wei-qi Zeng, Jin-song Liao // *Food Chemistry*. – 2021. – Vol. 343, 1 May. – 128523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128523>.
8. Kiosseoglou, V. Physicochemical properties of a dressing-type o/w emulsion as influenced by orange pulp fiber incorporation. / N. T. Chatsisvili, I. Amvrosiadis, V. Kiosseoglou // *LWT - Food Science and Technology*. – 2012. – Vol. 46, Is. 1, April. – P. 335-340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.08.019>.
9. Emulsifying and stabilizing properties of functionalized orange pulp fibers. / J. Wallecan, C. McCrae, S.J.J. Debon, J. Dong, J. Mazoyer. // *Food Hydrocolloids*. – 2015. – Vol. 47, May. – Pp. 115-123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.009>
10. Orange production worldwide from 2012/2013 to 2022/2023 (in million metric tons) <https://www.statista.com/statistics/577398/world-orange-production/>
11. Grapefruit production worldwide from 2012/2013 to 2022/2023 (in million metric tons) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.statista.com/statistics/577836/world-grapefruit-production/>
12. Grapefruit Juice - Worldwide [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.statista.com/outlook/cmo/non-alcoholic-drinks/juices/grapefruit-juice/worldwide>.
13. Технічний аналіз харчових добавок та косметичних продуктів : підруч. для студ. спец. 161 «Хімічні технології та інженерія», освіт.-проф. програми «Хімічні технології косметичних засобів та харчових добавок» / В. І. Воробйова, О. Е. Чигиринець, Т. М. Пилипенко, Л. А. Хрокало, В. Г. Єфімова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 345 с.
14. «Сучасні напрями розвитку технологій виробництва харчових продуктів» та «Сучасні фізико-хімічні методи у виробництві харчових продуктів» : метод. вказівки до лаб. робіт для студ. спец. 102 «Хімія» ден. форми навчання / уклад. Ю. В. Менафова. – Краматорськ : ДДМА, 2020. – 24 с.
15. Bioactive Substances, Heavy Metals, and Antioxidant Activity in Whole Fruit, Peel, and Pulp of Citrus Fruits / A. Czech, A. Malik, B. Sosnowska, P. Domaradzki // *International Journal of Food Science*. – Vol. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6662259>.
16. Карпик, Г. В. Харчові волокна фруктів та овочів / Г. В. Карпик, Н. Б. Сіржант // *Актуальні задачі сучасних технологій : V Міжнар. наук.-тех. конф. молод. учен. та студ. (м. Тернопіль 17-18 листоп. 2016 р.)*. Тернопіль, 2016. – С. 233-234.
17. Дослідження властивостей багатокомпонентних сумішей борошна / Т. Філінська, В. Шевченко, А. Філінська, С. Павлюк, І. Суха // *Технічні науки та технології*. – 2023. – № 1 (31). – С. 117-125. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1\(31\)-117-125](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-117-125).
18. ДСТУ 4560:2006 Майонези. Правила приймання та методи випробування. – Вид. офіц. – Чинний від 2008-01-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – 16 с. – (Національний стандарт України).

References

1. Rose Carla Ferreira deMenezes, Queliane Cristina de Carvalho Gomes, Beatriz Santos deAlmeida, Márcia Felgueiras Rebelo deMatos, Laise CedrazPinto. (2022). Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100599>.
2. Shweta Suri, Anupama Singh, Prabhat K. Nema. (2022). Current applications of citrus fruit processing waste: A scientific outlook. *Applied Food Research*, 2(1), 100050. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100050>.
3. Priyanka Dubey, Gyanendra Tripathi, Snober S. Mir, Owais Yousuf (2023). Current scenario and global perspectives of citrus fruit waste as a valuable resource for the development of food packaging film. *Trends in Food Science & Technology*, 141, 104190. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104190>.
4. Filinska, T., Filinska, A., & Pavliuk, S. (2023). Doslidzhennia vlastyvoستي funktsionalnykh dobavok roslynnoho pokhodzhennia dlia maioneznoi produktsii [Study of the properties of functional additives of vegetable origin for mayonnaise products]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 2(32), 282–288. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-282-288](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-282-288).
5. Evanuarini, H. Amertaningtyas, D., Utama, D., Safitri, A. (2020). The use of watermelon rind flour as stabilizer for reduced fat mayonnaise. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak*, 15(3), 172-182. <https://doi.org/10.21776/ub.jitek.2020.015.03.5>.
6. Dickinson, E. (2009). Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 23(6), 1473-1482. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.08.005>.
7. Jun-ru Qi, Li-wen Song, Wei-qi Zeng, Jin-song Liao (2021). Citrus fiber for the stabilization of O/W emulsion through combination of Pickering effect and fiber-based network. *Food Chemistry*, 343, 128523. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128523>.
8. Nino T. Chatsivili, Ioannis Amvrosiadis, Vassilis Kiosseoglou. (2012). Physicochemical properties of a dressing-type o/w emulsion as influenced by orange pulp fiber incorporation. *LWT - Food Science and Technology*, 46(1), 335-340. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.08.019>.
9. Wallecan, J., McCrae, C., Debon, S.J.J., Dong, J., Mazoyer, J. (2015). Emulsifying and stabilizing properties of functionalized orange pulp fibers. *Food Hydrocolloids*, 47, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.009>
10. Orange production worldwide from 2012/2013 to 2022/2023 (in million metric tons) <https://www.statista.com/statistics/577398/world-orange-production>.
11. Grapefruit production worldwide from 2012/2013 to 2022/2023 (in million metric tons) <https://www.statista.com/statistics/577836/world-grapefruit-production>.
12. Grapefruit Juice - Worldwide <https://www.statista.com/outlook/cmo/non-alcoholic-drinks/juices/grapefruit-juice/worldwide>.
13. Vorobiova, V. I., Chyhyrynets, O. E., Pylypenko, T. M., Khrokalo, L. A., Yefimova, V. H. (2020). *Tekhnichniy analiz kharchovykh dobavok ta kosmetychnykh produktiv: pidruch. dlia stud. spets. 161 «Khimichni tekhnologii ta inzheneriia», osvit.-prof. prohramy «Khimichni tekhnologii kosmetychnykh zasobiv ta kharchovykh dobavok» [Technical analysis of food additives and cosmetic products: textbook for students of specialty 161 «Chemical technologies and engineering», educational and professional program «Chemical technologies of cosmetics and food additives»]. KPI im. Ihoria Sikorskoho.*
14. Mienafoy, Yu.V. (Ed.). (2020). «Suchasni napriamy rozvytku tekhnologii vyrobnytstva kharchovykh produktiv» ta «Suchasni fizyko-khimichni metody u vyrobnytstvi kharchovykh produktiv»: metod. vkazivky do lab. robit dlia stud. spets. 102 «Khimii» den. formy navchannia [«Modern trends in the development of food production technologies» and «Modern physico-chemical methods in food production»: methodological guidelines for laboratory work for full-time students of the specialty 102 «Chemistry»]. DDMA.
15. Anna Czech, Agnieszka Malik, Bożena Sosnowska, Piotr Domaradzki (2021). Bioactive Substances, Heavy Metals, and Antioxidant Activity in Whole Fruit, Peel, and Pulp of Citrus Fruits. *International Journal of Food Science*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6662259>.
16. Karpyk, H.V., Sirzhant, N.B. (2016). Kharchovi volokna fruktiv ta ovochiv [Food fibers of fruits and vegetables]. *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnologii: V Mizhnar. nauk.-tekh. konf. molod. uchen. ta stud. – V International scientific and technical conference of young scientists and students. Actual tasks of modern technology* (pp. 233-234).

17. Filinska, T., Shevchenko, V., Filinska, A., Pavliuk, S., & Sukha, I. (2023). Doslidzhennia vlastyvoitei bahatokomponentnykh sumishei boroshna [Study of the properties of multicomponent flour mixtures]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies, 1 (31)*, 117–125. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1\(31\)-117-125](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-117-125).

18. DSTU 4560:2006 Maionezy. Pravyla pryimannia ta metody vyprobuvannia [Mayonnaises. Acceptance rules and test methods. (2008-01-01)]. Derzhspozhivstandard of Ukraine.

Отримано 18.12.2023

UDC 664.346

Tetiana Filinska¹, Antonina Filinska², Larisa Fursova³

¹PhD in Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers Fats and Food Products Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: f111nskaya@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

²senior lecturer of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: antoniyafilin@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

³master student of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: fursovalarisa05@gmail.com

STUDY OF THE PROPERTIES OF CITRUS PROCESSING PRODUCTS AS ADDITIVES FOR MAYONNAISE SAUCES

The growth of the cultivation and processing of citrus fruits is accompanied by the formation of a large amount of waste, which contains a number of useful nutrients and can serve as a valuable biological resource for various fields of application. The vitamins, trace elements, dietary fibers present in the composition allow you to use them as effective functional additives. The specificity of citrus dietary fibers is a large amount of protopectin, which determines their significant sorption properties. The ability of fibers to retain water makes them effective thickeners and attractive components of low-fat emulsion products, such as mayonnaise sauces. The article presents the results of a study of the properties of powders obtained from dried grapefruit and orange peels by grinding and dividing into fractions by sieving through sieves of different diameters. The indicators of the moisture-retaining capacity of grapefruit and orange powders, their blends and mixtures with coconut flour were determined. The stability of low-fat emulsion products obtained with the addition of the indicated additives in the amount of 5% to the recipe was studied.

The introduction of grapefruit and orange powder additives into the low-fat mayonnaise sauce recipe will enrich them with dietary fibers, give a piquant taste and aroma, and contribute to the formation of a product with proper rheological properties and consistency.

The analysis of research and publications showed that among the hydrocolloids used in the production of low-fat mayonnaise products, a special place is occupied by dietary fibers of citrus fruits with a high index of moisture retention capacity, which is higher than that of fibers from other raw materials, for example, carrots or oats. Considerable attention is paid to orange pulp powder products with a balanced content of soluble and insoluble dietary fibers, which serve as effective additives capable of retaining moisture and forming low-fat products with a thick consistency.

The purpose of the article is to study the properties of grapefruit peel powder and its mixtures with other functional additives for low-fat mayonnaise sauces; determination of their moisture retention capacity; production and stability research of low-fat mayonnaise sauces based on them.

For different size fractions of dried and crushed grapefruit and orange peel, indicators of moisture retention capacity were determined. It was established that this indicator has a larger value for the smallest fraction. For grapefruit powder with a particle size of less than 0.50 mm, the moisture retention capacity is 808 %, and for orange - 591%. A mixture of grapefruit and orange powder with different ratios of components was also found to have a high ability to retain water. Properties of mixtures of citrus powder and coconut flour were studied. Made samples of low-fat mayonnaise sauces with the addition of individual and complex functional additives in the amount of 5%. The effectiveness of their action was checked by determining the stability index of the manufactured emulsion products, which met the requirements set for mayonnaise and mayonnaise sauces by the current standard.

Keywords: mayonnaise sauces; grapefruit; orange; coconut flour; cellulose; functional supplement; moisture retention capacity.

Table: 4. References: 18.

**Anna Kokosha¹, Dmytro Uschapovskiy², Viktoriya Vorobyova³,
Tetiana Motronyuk⁴, Georgy Vasiliev⁵**

¹ Student, Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: anna.kokosha88@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7299-511X>

² PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: soldim@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

³ Doctor in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Physical Chemistry Technology
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

⁴ PhD in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: t.motroniuk@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3717-5934>

⁵ Doctor in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: g.vasilyev@kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

CORROSION RESISTANCE OF ZINC GALVANIC DEPOSITS OBTAINED BY THE ELECTROCHEMICAL 3D PRINTING METHOD

The article is devoted to the implementation of the process of electrochemical 3D printing of zinc products and the determination of the effect of the method of their production on corrosion resistance. The possibility of electrochemical 3D printing of zinc objects with a fine-crystalline compact structure using high-speed sulfate plating electrolyte has been shown. The most resilient and elastic zinc deposits were obtained in the electrolyte without the addition of organic additives and when gelatin was added to the electrolyte. The use of naphthalene disulfonic acid of 1,5-disodium salt made it possible to obtain the most finely crystalline and semi-glossy zinc deposits, but the fragility of the deposits increased somewhat. Conducted studies of the corrosion resistance of printed zinc objects showed that the use of electrochemical 3D printing as a method of obtaining and introducing organic additives into the electrolyte does not lead to a decrease in the corrosion resistance of the metal.

Keywords: zinc; local electrodeposition; electrochemical 3D printing; sulfate electrolyte; surface active additives; corrosion resistance.

Table: 3. Fig.: 5. References: 18.

Relevance of the research. 3D printing is the newest additive technology that makes it possible to obtain metal products that are unique in their application and configuration complexity [1]. However, most 3D printing methods are energy-consuming, due to the presence of a stage of converting the metal into a liquid state during printing. The use of powdered metals makes this technology environmentally hazardous and explosive. Electrochemical 3D printing is a technology derived from local electrodeposition and is the most energy-efficient method of 3D printing metal products [2-6]. The advantage of electrochemical 3D printing in particular is selectivity and the absence of the need to use protective screens to limit the area of electrodeposition.

Problem statement. Most of the known sources in the relevant field of research are dedicated to the electrochemical 3D printing of metal objects from metals such as copper, nickel is somewhat less common [7]. Sources related to electrochemical 3D printing of zinc products are scarce.

Analysis of recent research and publications. The advantage of zinc as a metal in this case may be a slightly higher value of the electrochemical equivalent than for nickel and copper. This can give some advantage in the value of the metal deposition (printing) rate. In addition, similar to local electrodeposition technology, electrochemical 3D printing can be used for the purpose of manufacturing protective elements or electrodeposition of zinc-based protective coatings [8,9]. An important technological characteristic of any metal product is its corrosion resistance under appropriate operating conditions. Literary data on corrosion resistance and protective properties of various types of galvanic coatings are quite numerous. However, it should be noted that in electrochemical 3D printing, the current regime is different from that which is usually used for electrodeposition of galvanic coatings. The current mode during electrochemical 3D printing or local electrodeposition [4,6] with the movement of the counter electrode can be equivalent to the

pulse mode of electrolysis. During printing, at a certain moment in time, the working electrode (anode) is located over a certain area on a closed trajectory of its movement. As the working electrode approaches this area, the current pulse will increase, which will decrease after it moves away. As is known, the current regime, and especially the non-stationary one, can significantly affect both the crystal structure of the metal and its corrosion resistance [10, 11].

Uninvestigated parts of a common problem. The current mode can affect the process of adsorption and inclusion of surface-active additives in the metal deposit, which are used to improve the quality of cathode deposits of metals. In addition to the positive effect on the crystalline structure of the metal, surface-active additives due to inclusion in the crystalline structure of the metal can cause the process of corrosion destruction [12,13].

Research objective. The research presented in this article is devoted to the implementation of the process of electrochemical 3D printing of zinc products and the determination of the effect of the method of their production on corrosion resistance.

Research methodology

Methodology of electrochemical 3D printing on a device with a rotating electrode

Local electrodeposition - electrochemical 3D printing was carried out on the installation, the schematic diagram of which is shown in Fig. 1. An AISI 321 stainless steel plate (cathode) was placed at the bottom of the plastic vessel and connected to the negative pole of the DC source. Stainless steel was chosen to allow easy separation of the printed object from the cathode surface. The working electrode was rotated by an electric motor, the speed of rotation was 1 s^{-1} . An inert platinated titanium electrode was used as the working electrode-anode [14].

The algorithm for conducting experimental research was as follows. The stainless steel cathode was polished using polishing cloth wheels, degreased and placed on the bottom of the vessel. An electrolyte solution with a volume of 1 liter was poured into the vessel, the level of the electrolyte was 10...15 mm above the substrate. The edge of the dielectric body of the anode was placed at a height of 1 mm above the substrate. After that, with the help of an electric motor, the cathode began to rotate and a current with a density of $2...4 \text{ A/dm}^2$ was supplied. After the end of the experiment, the current was turned off, and the solution was drained from the vessel. The locally electrochemically printed object in the form of a ring was washed with distilled water, removed from the substrate and examined.

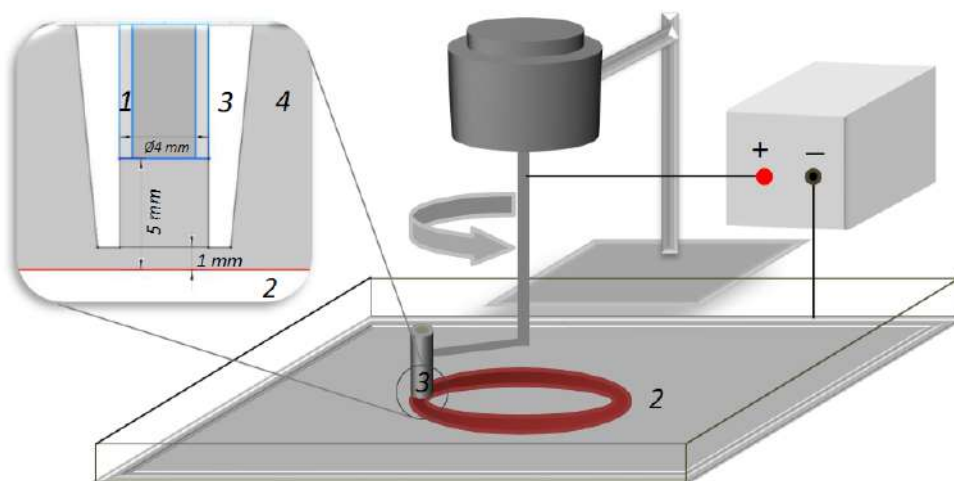


Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory installation:
1 – platinated foil (anode); 2 – stainless steel base (cathode);
3 – polypropylene capillary; 4 – electrolyte [14]

Methodology of corrosion tests. Corrosion resistance of printed zinc objects was evaluated with polarization and electrochemical impedance measurements.

The rate of corrosion was determined by the method of direct polarization. For this, anodic and cathodic polarization curves were obtained on fragments of printed part with a scanning rate of 2 mV/s. As a working solution, 3.5% sodium chloride was used. Polarization curves were recorded in a conventional three-electrode cell. A platinum electrode was used as an auxiliary. The rate of corrosion was determined graphically by finding the intersection of the extrapolated linear sections of the polarization curves plotted in semi-logarithmic coordinates.

The measurement of electrochemical impedance was carried out in order to determine the polarization resistance of the studied samples using a digital potentiostat VersaSTAT 3 AMETEK. The frequency range of alternating current was $10^5 \dots 5 \cdot 10^{-2}$ Hz. In order to measure the electrochemical impedance, special two-electrode probes were developed, which were made from fragments of printed zinc objects (Fig. 2). The working surface area of the sensor is 0.9 cm^2 . The distance between the working area of the sensor was 2 mm. The non-working surface of the fragments was covered with a layer of electrically insulating lacquer coating. Before measurements, the sensors were kept in the working solution for corrosion tests for 0.5...1 h.

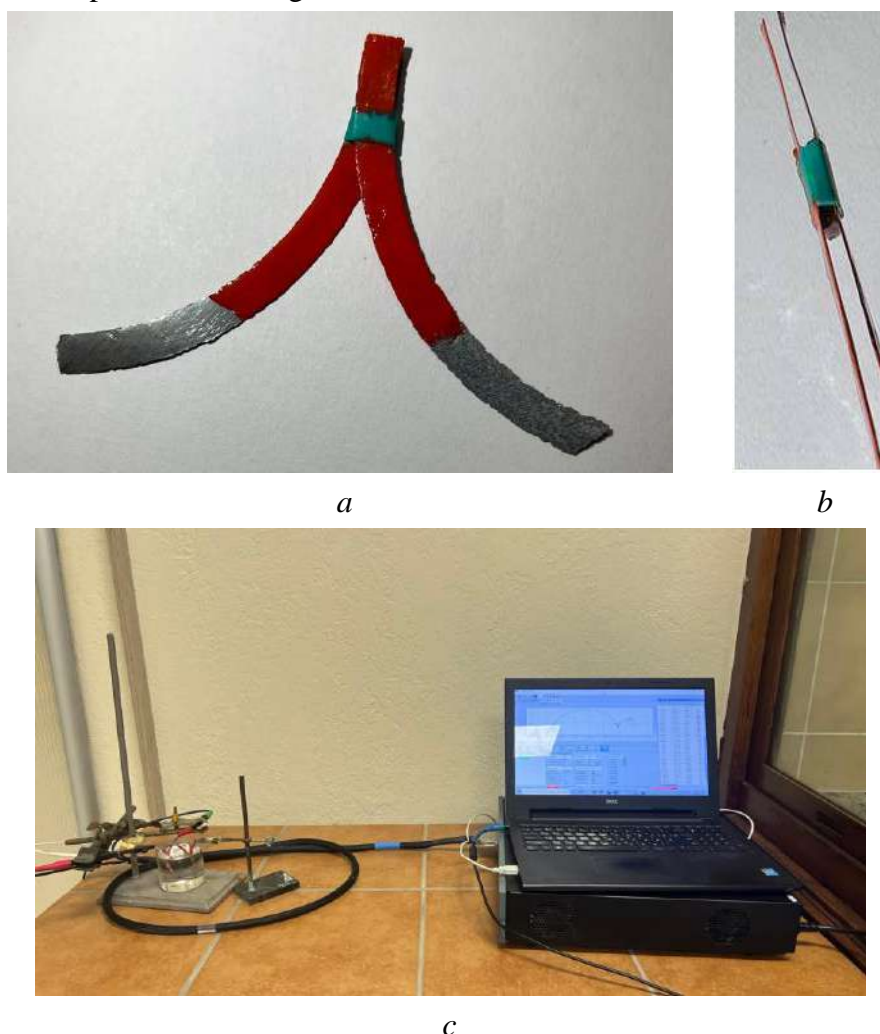


Fig. 2. A probe from fragments of an electrochemically printed zinc object "ring" (a, b) and an electrochemical impedance measurement setup using AMETEK's VersaSTAT 3 digital potentiostat (c)

Research results of electrochemical 3D printing of the "ring" object. At this stage of research, local electrodeposition (electrochemical printing) of zinc objects "ring" with a thickness of $180 \dots 240 \text{ }\mu\text{m}$ was carried out. Sulfate electrolyte was chosen for the research because

it is relatively environmentally safe. In addition, this electrolyte is highly productive due to the possible zinc sulfate content of about 600 g/l [15]. The pH value in the electrolyte was maintained in the range of 3.5...4.5. For this purpose, 30 g/l of ammonium sulfate and 20 g/l of aluminum-potassium sulfate were added to the electrolyte. Such well-known additives for zinc plating electrolytes as thiourea, gelatin, OP-10, naphthalene disulfonic acid, 1,5-disodium salt were introduced into the electrolyte in order to improve the structure and appearance of cathode deposits. The composition of the electrolytes and the duration of the process for each experiment, as well as the measured thickness of the obtained objects are shown in the Table 1.

Table 1 – Composition of electrolytes and research conditions





№	Electrolyte composition, g/l	Duration of the process, min	Current densities, A/dm ²	Calculated thickness, μm	Measured thickness, μm
1	ZnSO ₄ ·7H ₂ O – 600; (NH ₄) ₂ SO ₄ – 30	215	2,4	147	200
2	ZnSO ₄ ·7H ₂ O – 600; (NH ₄) ₂ SO ₄ – 30; gelatin – 0,1	210	2,4	142	180
3	ZnSO ₄ ·7H ₂ O – 600; (NH ₄) ₂ SO ₄ – 30; naphthalene disulfonic acid of 1,5-disodium salt – 2	320	2,6	238	240
4	ZnSO ₄ ·7H ₂ O – 600; (NH ₄) ₂ SO ₄ – 30; naphthalene disulfonic acid of 1,5-disodium salt – 2; ОП-10 – 0,25; KAl(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O – 20	260	3,0	222	220

During the study of the process of electrochemical 3D printing using sulfate electrolyte, it was established that electrochemical printing with obtaining a compact, fine crystal structure of metal is possible at an average current density of 2,4...3 A/dm² (Table 2). When trying to obtain objects at higher current densities, the growth of dendrites began on the zinc surface, which is related to the used current regime, which is different from the stationary one. It was also established that the most elastic zinc deposits were obtained in the electrolyte without the addition of organic additives and when 0.1 g/l of gelatin was added to the electrolyte. However, in the corresponding electrolytes, zinc deposits were coarser and more prone to dendrite formation. Accordingly, this explains the fact that the experimental thickness is greater than the calculated one (Table 1). When using naphthalene disulfonic acid of 1,5-disodium salt at a concentration of 2 g/l, the most finely crystalline and semi-glossy zinc deposits were obtained, but the fragility of the deposit increased to some extent. Additive OP-10 was applied to eliminate pitting and shells in the metal deposit, which were the result of a parallel process - the hydrogen evolution.

The study of the corrosion properties of electrochemically printed metal deposits was conducted using fragments of the "ring" objects obtained in experiments № 1...4 (tables 1 and 2). Samples of hydroelectrometallurgically obtained zinc plates were used as reference samples.

Polarization curves were obtained for the studied samples in order to find instantaneous values of the corrosion rate. A fragment of an electrochemically printed object served as the working electrode. The area of the working surface, not insulated with varnish, of all the studied samples was 0.4 cm². Corrosion diagrams, built on the basis of the obtained polarization curves, are shown in Fig. 2.

Table 2 – The influence of the current mode on the quality of the metal deposit of electrochemically printed "ring" objects

	№ of experiments from table 1	
	1	2
Electrochemically printed zinc objects		
		

The results of corrosion tests of the obtained "ring" objects
Corrosion diagrams

It can be seen from the obtained polarization curves (Fig. 3) that all investigated zinc galvanic deposits are actively dissolved in the investigated sodium chloride solution when anodic polarization is applied. On the cathodic polarization curve, the limiting current of electroreduction of oxygen is observed, which smoothly transitions to the next process of hydrogen release. Corrosion potential E_c and corrosion rate were determined using the obtained corrosion diagrams. The results of determining the corrosion rate and corrosion potential are shown in Table 3.

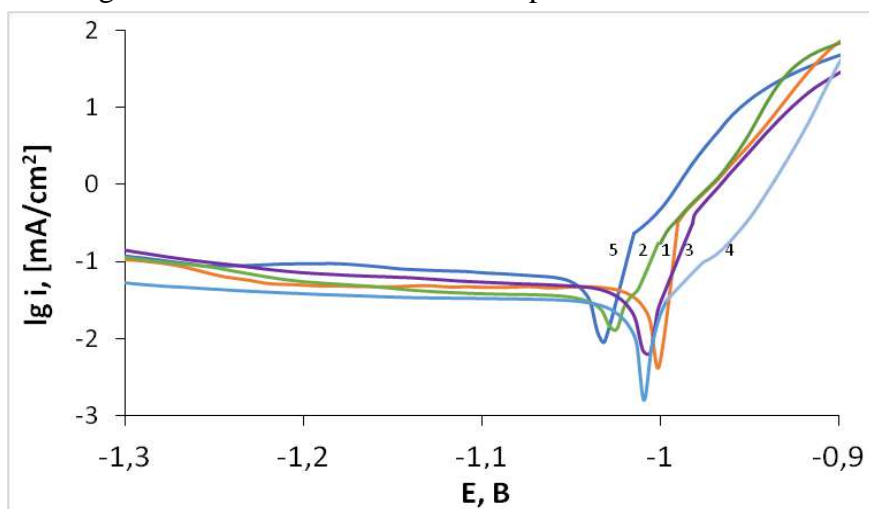


Fig. 3. Corrosion diagrams for samples of zinc deposits in a 3.5% sodium chloride solution: 1 – electrochemically printed in sulfate electrolyte without additives; 2 – electrochemically printed in a sulfate electrolyte with the addition of gelatin; 3 – electrochemically printed in a sulfate electrolyte with the addition of naphthalene disulfonic acid 1.5 disodium salt; 4 – electrochemically printed in a sulfate electrolyte with the addition of naphthalene disulfonic acid 1.5 disodium salt and OP-10; 5 – hydrometallurgical zinc

Table 3 - Corrosion characteristics of electrochemically printed zinc in a 3,5% sodium chloride solution

№ of experiments from Table.1	E_c, V	$lg i_c$	$i, mA/cm^2$	$R_p, Ohm \cdot cm^2$
1	-1,00	-1,36	0,044	1054
2	-1,02	-1,44	0,036	1147
3	-1,01	-1,31	0,049	1000
4	-1,01	-1,49	0,032	1272
5*	-1,03	-1,19	0,060	950

* hydroelectrometallurgical zinc

Also, in this work, electrochemical impedance measurements were carried out in order to identify the mechanism of the controlling stage and to determine the polarization resistance of printed deposits samples. The results of these measurements are presented in the form of Bode and Nyquist plots in Fig. 4.

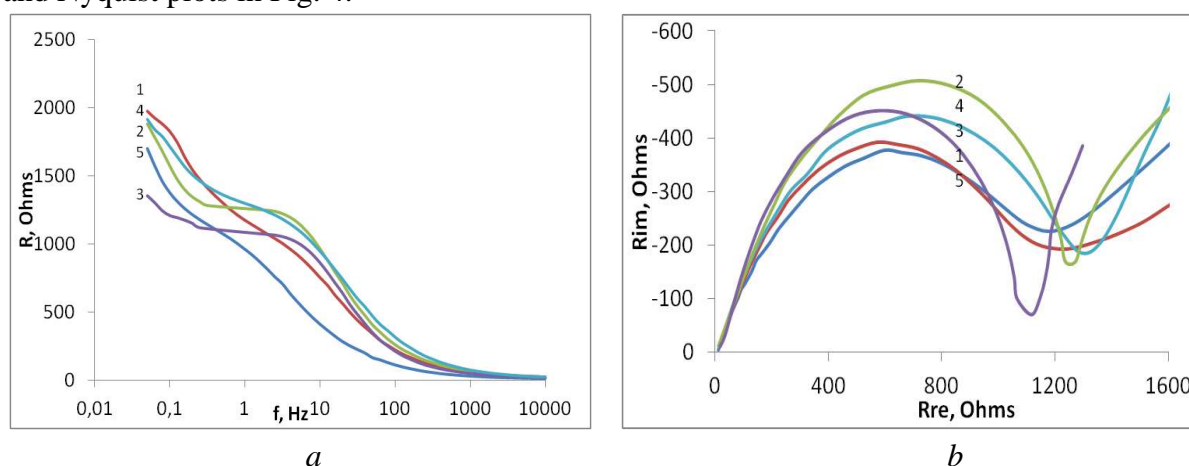


Fig. 4. Bode (a) and Nyquist (b) plots for zinc deposits in a 3.5% sodium chloride solution: 1 – electrochemically printed in a sulfate electrolyte with the addition of gelatin; 2 – electrochemically printed in sulfate electrolyte without additives; 3 – electrochemically printed in a sulfate electrolyte with the addition of naphthalene disulfonic acid 1.5 disodium salt; 4 – electrochemically printed in a sulfate electrolyte with the addition of naphthalene disulfonic acid 1.5 disodium salt and OP-10; 5 – hydrometallurgical zinc

The obtained form of the Bode and Nyquist plots corresponds to the course of the corrosion process with mixed diffusion-kinetic control (Fig. 4), which is consistent with the data [16-18] and the obtained corrosion diagrams (Fig. 3). Accordingly, the equivalent electrical circuit of the surface of the corroding zinc sample corresponds to Fig. 5 b.

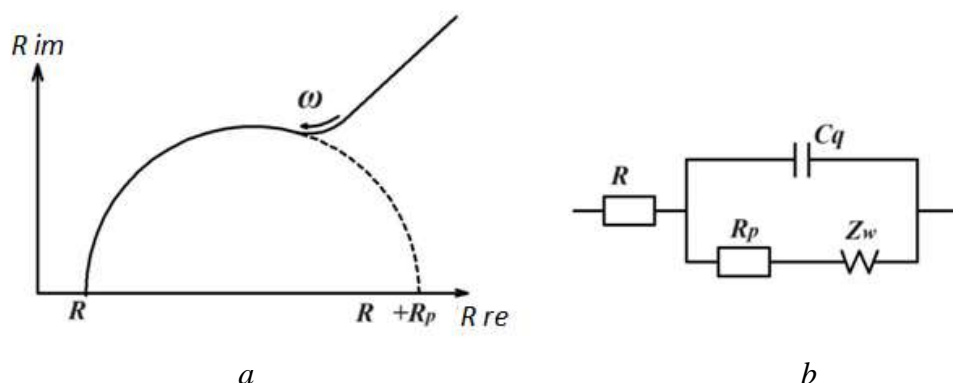


Fig. 5. The theoretical form of the Nyquist plot for diffusion-kinetic control of the corrosion process (a) and the equivalent scheme of the zinc electrode surface (b) in the process of corrosion destruction [18], where: R is the resistance of the electrolyte, R_p is the polarization resistance, Z_w is the diffusion component of the Warburg impedance, C_q is the capacitance of the double electric layer

In this case, R_p represents the difference between the resistance value at the intersection of the dotted line with the R_{re} axis ($R+R_p$) and the electrolyte resistance value R . According to the obtained Nyquist plot (Fig. 4), R_p was obtained by finding the larger root of the quadratic approximation polynomial, which is quite accurate the first section of the dependence on the Nyquist plot is approximated. The determined values of the polarization resistance in Table 3 are given taking into account the working surface area of the used probe. As can be seen from Table 3, there is a corresponding inverse correlation between the results of determining the corrosion rate and polarization resistance. In general, the results of corrosion tests indicate that the method of obtaining metallic zinc parts by electrochemical 3D printing does not cause a decrease in the corrosion resistance of the metal.

Conclusions. In the course of the conducted research, it was established that electrochemical 3D printing of zinc parts with obtaining a fine crystal structure of the metal, using a concentrated sulfate galvanizing electrolyte, is possible with the use of cathodic current densities up to 3 A/dm^2 .

Based on polarization measurements and electrochemical impedance measurement, it was established that electrochemically printed zinc parts are not inferior to hydroelectrometallurgically obtained zinc samples in terms of corrosion resistance.

References

1. Rafiee, M., Farahani, R.D., Therriaul, D. (2020). Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey. *Adv. Sci.* 1902307. <https://doi.org/10.1002/advs.201902307>.
2. Braun, T.M., Schwartz, D.T. (2016). The Emerging Role of Electrodeposition in Additive Manufacturing. *Electrochem. Soc. Interface*, 25, 69–73. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.F07161if>.
3. Chen, X., Liu, X., Childs, P., Nigel, B., Wu, B. (2017). 3D Printing: A Low Cost Desktop Electrochemical Metal 3D Printer. *Advanced Materials Technologies*, 2(10), 1700148 <https://doi.org/10.1002/admt.201770046>.
4. Liu, P., Guo, Y., Wu, Y., Chen, J., Yang, Y. (2020). A Low-Cost Electrochemical Metal 3D Printer Based on a Microfluidic System for Printing Mesoscale Objects. *Crystals*, 10(4), 257. <https://doi.org/10.3390/cryst10040257>.
5. Behroozfar, A., et al. (2018) Minary-Jolandan M. Microscale 3D Printing of Nanotwinned Copper. *Adv. Mater.*, 30(4). <https://doi.org/10.1002/adma.201705107>.
6. Seol, S.K., et al. (2015). Electrodeposition-based 3D Printing of Metallic Microarchitectures with Controlled Internal Structures. *Small*, 11(32), 3896–3902. <https://doi.org/10.1002/sml.201500177>.
7. Xu, J., et al. (2020). A review: development of the maskless localized electrochemical deposition technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110, 1731–1757 <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05799-5>.
8. Radek, N., Pietraszek, J., Klimecka-Tatar, D. (2020). Production of zinc coatings by electrospark deposition. *CzOTO*, 2(1), 253 – 258. <https://doi.org/10.2478/czoto-2020-0031>.
9. Singh R., et al. (2024). Establishing industrial Zn-Ni brush electroplating process without post-plating hydrogen embrittlement relief baking. *Surface and Coatings Technology*, 478, 130363. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130363>.
10. Behera, P. (2021). Effect of brush plating process variables on the microstructures of Cd and ZnNi coatings and hydrogen embrittlement. *Surface and Coatings Technology*, 417, 127181 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127181>.
11. Lei, C. (2020). Gamma-phase Zn-Ni alloy deposition by pulse-electroplating from a modified deep eutectic solution. *Surface and Coatings Technology*, 403, 126434. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126434>.
12. Ushchapovskiy, D., et al. (2019). Effect of saccharin on corrosion resistance of bright Ni coatings under conditions simulating a wet tropical climate. *Materials Today: Proceedings*, 6, 171–177 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.091>.
13. Ushchapovskiy, D.Y., et al. (2023). Comparative study of corrosion activity of bright and matte nickel coatings in solutions and vapor of acetic acid. *Mater. Sci.*, 58, 540–547 <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00696-0>.

14. Vasyliiev, G., et al. (2023). Influence of polarization curve slope on the accuracy of local copper electrodeposition from sulphate electrolyte. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 13(6), 971–980. <https://doi.org/10.5599/jese.1899>.

15. Basak P. S., (2021). Effect of ZnSO₄·7H₂O concentration of electrolyte solution on Zn electrode position process. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 14(9), 10-15. <https://doi.org/10.9790/5736-1409011015>.

16. Andrade, C., Castelo, V. (1984). Practical measurement of the AC impedance of steel bars embedded in concrete by means of a spectrum analyser. *British Corrosion Journal*, 19(2), 98-100. <https://doi.org/10.1179/000705984798273425>.

17. Walter, G. W. (1986). A review of impedance plot methods used for corrosion performance analysis of painted metals. *Corrosion Science*, 26(9), 681-703. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(86\)90033-8](https://doi.org/10.1016/0010-938X(86)90033-8)

18. Ambrosi, V., Di Sarli, A. (1993). Development of a mathematical treatment for electrochemical impedance data obtained from coated metals: Part 1. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 40(9), 4-9. <http://dx.doi.org/10.1108/eb007329>.

Отримано 13.02.2024

УДК 621.357:669.018.8

**Анна Кокоса¹, Дмитро Уцаповський², Вікторія Воробйова³,
Тетяна Мотронюк⁴, Георгій Васильєв⁵**

¹ студент, кафедри технології електрохімічних виробництв

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

E-mail: anna.kokosha88@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7299-511X>

² кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології електрохімічних виробництв

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

E-mail: soldim@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

³ доктор технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії

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

E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

⁴ кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв

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

E-mail: t.motroniuk@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3717-5934>

⁵ доктор технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв

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

E-mail: g.vasyliiev@kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

КОРОЗИЙНА СТІЙКІСТЬ ЦИНКОВИХ ВИРОБІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗД-ДРУКУ

Стаття присвячена реалізації процесу електрохімічного ЗД-друку виробів із цинку та визначенню впливу способу їх одержання на корозійну стійкість. Показана можливість електрохімічного ЗД друку об'єктів з цинку при товщині осадуваного шару металу 180...240 мкм в інтервалі густини струму 2,4...3,0 А/дм², із дрібнокристалічною компактною структурою при використанні швидкісного сульфатного електроліту цинкування. Найбільш пружні та еластичні осади цинку були отримані в електроліті без додавання органічних добавок та при введенні до електроліту желатину. При використанні як добавка, нафталін дисульфокислоти 1,5-динатрієвої солі були отримані найбільш дрібнокристалічні та напівблискучі осади цинку, проте крихкість осадів децю зросла. З метою оцінки корозійної стійкості та визначення швидкості корозії були застосовані методи побудови поляризаційних кривих та вимірювання електрохімічного імпедансу. Для реалізації останнього із фрагментів електрохімічно надрукованих цинкових об'єктів були створені спеціальні датчики. Проведені дослідження корозійної стійкості надрукованих цинкових об'єктів у 3,5 % розчині хлориду натрію показали швидкість корозії варіюється в межах 0,03...0,06 мА/см². Вигляд, отриманих при вимірюванні електрохімічного імпедансу, діаграм Боде та Найквіста свідчить про те, що корозія надрукованих цинкових зразків відбувається зі змішаним дифузійно-кінетичним контролем. Характер зміни величин швидкостей корозії та розрахункових, на основі діаграм Найквіста, поляризаційного опору вказують на те, що використання електрохімічного ЗД-друку як способу отримання та введення при цьому в електроліт органічних добавок не призводить до зниження корозійної стійкості металу.

Ключові слова: цинк; локальне електроосадження; електрохімічний ЗД друку; сульфатний електроліт; поверхнево активні добавки; корозійна стійкість.

Табл.: 3. Рис.: 5. Бібл.: 18.

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-1(35)-240-250

УДК 629.374.7

Юрій Денисов¹, Віталій Скугарев²

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроніки, автоматичної, робототехніки та мехатроніки
Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)
E-mail: den711td@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>
ResearcherID: G-1144-2016. Scopus Author ID: 56338219200

²аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)
E-mail: v.skugarev88@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0008-2538-6997>. ResearcherID: JOK-0150-2023

ВПЛИВ ПУЛЬСАЦІЙ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ НА ПОХИБКУ ЗА ФАЗОЮ РОБОЧОГО ОРГАНУ БОРТОВОЇ АВІАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ СЛІДКУВАННЯ

На борту літального апарату забезпечення оптимальних режимів роботи авіаційного двигуна відбувається за допомогою автоматичної системи управління. Її функції пов'язані з моніторингом поточних параметрів режимів роботи авіадвигуна, їх індикацією управління окремими робочими органами, які забезпечують подачу палива, повітря запал за командами бортового комп'ютера. Ці команди виконують автоматизовані електроприводи малої потужності. Вони входять до систем відповідних виконавчих органів, що слідкують за параметрами режимів роботи авіадвигуна. Сучасні бортові електроприводи виконують на основі безколекторних двигунів, які працюють у режимі електромашини постійного струму або в синхронному режимі, як машина змінного струму. Ці електроприводи слідкують за заданими законами зміни окремих параметрів, наприклад, за фазовим положенням робочих органів механізмів, що забезпечують задані режими роботи авіадвигуна. Живлення бортового електропривода системи слідування відбувається від акумулятора через автономний інвертор напруги, якщо безколекторна електромашинка працює в синхронному режимі, або ж в режимі колектора, якщо вона працює в режимі машини постійного струму.

Точність виконання заданих законів слідування є головним показником таких систем. На цей показник впливають багато чинників, одним з головних серед них є пульсації напруги живлення, які є наслідком дискретного режиму роботи автономного інвертора, що висуває актуальну проблему аналізу їхнього впливу на точність виконання законів слідування.

Ключові слова: літальний апарат; електроприводи, що слідкують; автономний інвертор напруги; пульсації напруги живлення; процеси кінцевої тривалості.

Рис.: 3. Бібл.: 14.

Постановка проблеми. Враховуючи суттєвий вплив пульсацій напруги автономного інвертора (АІН) на точність відстежувального електропривода, виникає актуальна проблема оцінки рівня їх впливу та пошук шляхів його зменшення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних публікацій з тематики досліджень [1-7] показав, що в процесі розробки електроприводів, що стежать, їх точність оцінюють за основною гармонікою без врахування впливу пульсацій напруги живлення. Припущення про синусоїдальну форму напруги на виході інвертора [8] суттєво спрощує аналіз основних характеристик відстежувального електропривода. Але реальна прямокутна форма напруги на виході інвертора впливає на плавність обертання ротора електродвигуна, знижує точність слідування. Причиною цього є пульсуючі моменти, що виникають в результаті взаємодії поля основної гармоніки з полями струму вищих гармонік. Найбільшу амплітуду пульсуючому моменту створюють струми п'ятої на сьомої гармонік. Загалом найбільша амплітуда пульсацій моменту в зоні нелінійних навантажень становить до 10 % від номінального моменту. Тому актуальною є проблема дослідження впливу форми напруги АІН на похибку електропривода, що слідує за законом зміни відповідного параметра в системі управління режимами роботи авіадвигуна [9].

Метою роботи є аналіз похибки слідування за законом зміни фази відповідного робочого органу в системі управління авіаційним двигуном та пошук шляхів її мінімізації.

Виклад основного матеріалу.

1. Загальні припущення. Досягнення поставленої мети ускладнюються такими факторами.

Дискретна нелінійність АІН, яка є наслідком закону перемикання силових транзисторів та мікропроцесами, які його супроводжують, наявністю інтервалів обміну енергії між навантаженням та джерелом живлення.

Суттєвою нелінійністю безколекторного двигуна з постійними магнітами, наявністю цифрових ланок. Це аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), мікропроцесори в інформаційних складових електроприводу, у яких відбувається квантування за часом та за рівнем.

Нелінійністю фазового дискримінатора, який в електроприводах, що слідкують за фазою, виконує функцію елемента порівняння. Суттєвим впливом пульсації напруги, що живить електродвигун, на похибку слідкування за законом, що задано на вході системи.

З урахуванням наведених факторів мету, що поставлена, не можна досягти порівняно просто та з достатньою точністю. Якщо виходити з того, що рішення, яке треба знайти, повинно бути з мінімальною похибкою, то можна запропонувати такі шляхи його пошуку. Спочатку лінеаризується вся нелінійна ланка системи в зоні робочих точок, а потім реалізується процес аналітичного пошуку бажаного рішення. Аналітичне рішення лінеаризованої дискретної системи можна знайти за допомогою математичного апарату лінійних дискретних систем (Z – перетворення), який дозволяє в загальному вигляді знайти вплив дискретності системи слідкування (пульсації) на її похибку.

Для реалізації запропонованого шляху прийнято такі припущення: транзистори інвертора вважаються ідеальними ключами з нульовим часом перемикання; безколекторний двигун з постійними магнітами в синхронному режимі вважається коливальною ланкою з постійними параметрами; в цифрових блоках системи управління не враховується ефект квантування за часом та за рівнем; складна імпульсна модуляція, що відбувається в межах робочої точки, замінюється еквівалентною амплітудо-імпульсною модуляцією. Структурна схема автоматизованого електроприводу для слідкування за фазою виконавчого органу бортової системи слідкування представлена на рис. 1.

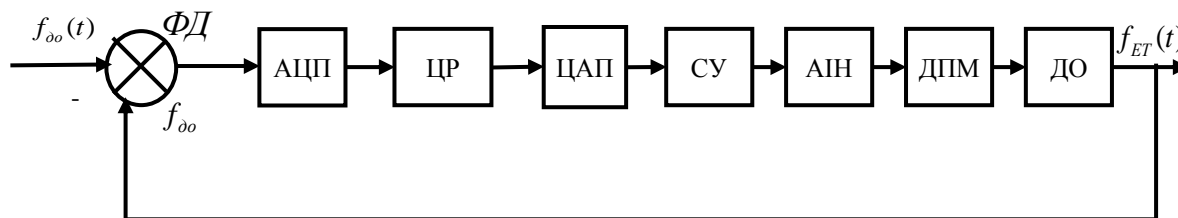


Рис.1 Структурна схема автоматизованого електропривода,

де АЦП – аналого-цифровий перетворювач з передаточним коефіцієнтом $\delta_1 \frac{\text{код}}{\text{напруга}}$;

ЦР – цифровий регулятор;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, дискретна передаточна функція якого

$$K_{\text{ЦАП}}(z) = \delta_2 \frac{z-1}{zq},$$

де $\delta_2 \frac{\text{код}}{\text{напруга}}$ – коефіцієнт передачі;

АІН – автономний інвертор напруги;

ДПМ – двигун з постійними магнітами, який може працювати в режимі електромашини постійного струму, або ж у синхронному режимі;

ДО – датчик одного оберту;

ФД – фазовий дискримінатор, на вхід якого надходять дві імпульсні послідовності еталонна $f_{ET}(t)$, що звичайно стабілізується кварцем, і частота з давача одного оберту f_{oo} , яка фіксує поточну фазу ротора двигуна. У процесі обчислення помилки слідкування частота імпульсів, що надходять з давача одного оберту, змінюється під впливом збурень, одним з основних серед яких є пульсації живлячої напруги. Залежно від знака помилки в системі

реалізується режим підвищення швидкодій $f_{ET} > f_{\text{до}}$ або гальмування $f_{ET} < f_{\text{до}}$. При цьому буде змінюватися і знак фазової розбіжності. Для забезпечення адекватної реакції ланцюга зворотного зв'язку ФД повинен виконувати дві функції: обчислення абсолютного значення фази розбіжності та розбіжності за частотою ($f_{ET} - f_{\text{до}}$), обчислення фази розбіжності виконується за допомогою RS тригера, різницю частот обчислює фазовий детектор, що є складовою часткою фазового дискримінатора. Знак різниці частот ($f_{ET} - f_{\text{до}}$) дозволяє адекватно реагувати системі регулювання на зміну її фазової розбіжності, тобто реалізувати розгін або гальмування електродвигуна.

На виході RS тригера, що є часткою ФД, формуються прямокутні імпульси зі шпаруватістю $\gamma = \frac{\Delta t_{cp}}{T}$, де Δt_{cp} – фазова розбіжність, $T = \frac{1}{f_{ET}}$. Така ситуація характерна для ве-

ликих значень збурюючих впливів. Коли збурення незначні, то різним рівням фазової розбіжності на виході відповідають різні рівні постійної напруги, яка надходить до системи, що управляє АІН. Силова складова системи слідкування, рис. 1, включає в себе автономний інвертор напруги та безколекторний двигун з постійними магнітами (БДПМ).

Згідно з теорією лінійних імпульсних систем [10; 11] АІН, як ланку системи, представляємо сукупністю імпульсного елемента (ІЕ) миттєвої дії та формуючого елемента (ФЕ), на виході якого присутня реальна форма вихідної фазної напруги АІН. Оскільки вплив обох напівхвиль вихідної напруги АІН на електродвигун рівнозначний, то звичайно вважають, що на нього надходить одна півхвиля з частотою, яка вдвічі вище за частоту АІН (рис. 2).

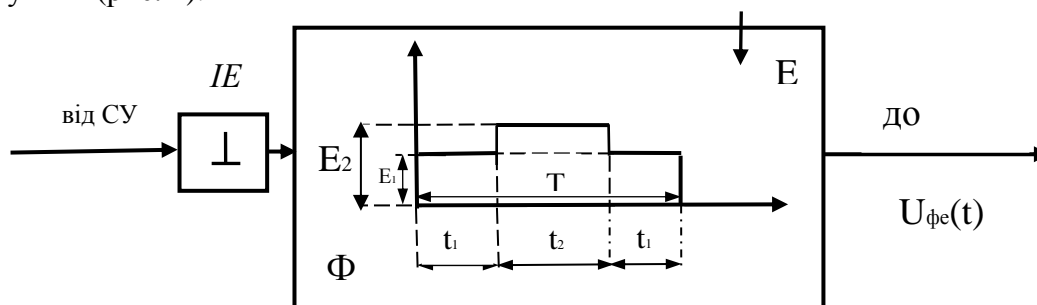


Рис. 2. Структурна схема автономного інвертора як ланки системи управління:

СУ – система управління, ІЕ – імпульсний елемент, ФЕ – формуючий елемент, БДПМ – безколекторний двигун з постійними магнітами, E – напруга на вході АІН

Форму напруги на виході формуючого елемента (рис. 2) можна представити сукупністю ступеневих функцій:

$$U_{\Phi E}(t) = \bar{E}_1 [1(t) - 1(t - t_1)] + \bar{E}_2 [1(t - t_1) - 1(t - t_1 - t_2)] + \bar{E}_1 [1(t - t_1 - t_2) - 1(t - T) - 1(t - T)], \quad (1)$$

де $\bar{E}_1 = \frac{E_1}{E}$, $\bar{E}_2 = \frac{E_2}{E}$; T – період роботи формуючого елемента; E – рівень напруги живлення, що надходить від акумулятора.

Передаточна функція формуючого елемента є перетворення Лапласа від (1).

$$K_{\Phi E}(p) = \frac{\bar{E}_1 (1 - e^{-pt_1}) + \bar{E}_2 (1 - e^{-pt_2}) e^{-pt_1} + \bar{E}_1 (1 - e^{-pT}) e^{-p(t_1 + t_2)}}{p} \quad (2)$$

Коефіцієнт передачі імпульсного елемента $K_{IE} = 1$.

У синхронному режимі роботи передаточна функція лінеаризованого безколекторного двигуна з постійними магнітами має другий порядок:

$$K_{\Phi E}(p) = \frac{a_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (3)$$

Такий режим роботи є характерним для слідкуючих електроприводів. Але запуск відбувається в режимі безколекторного двигуна постійного струму, в якому АІН виконує функцію колектора. У цьому режимі безколекторний двигун має хороший пускові та регульовальні характеристики, але його механічна характеристика м'яка. У синхронному режимі механічна характеристика стабільна (жорстка), тому такий режим є привабливим для реалізації його в слідкуючому електроприводі. У подальшому аналізі безколекторний двигун розглядається як синхронна електрична машина, що живиться від акумулятора з вихідною напругою E через автономний інвертор.

2. Похибка слідкування з врахуванням реальної форми напруги на виході АІН.

Передаточна функція силових ланок системи слідкування:

$$K_c(p) = K_{\Phi E}(p)K_q(p).$$

Для відносного значення комплексного змінного $q = pT$

$$K_c(q) = \frac{1}{T} K_{\Phi E}\left(\frac{q}{T}\right) K_q\left(\frac{q}{T}\right).$$

З врахуванням (2), (3) та полюса дискретної передаточної функції ЦАП маємо:

$$\frac{K_c(q)}{q} = a_0 T \frac{\bar{E}_1(1 - e^{-\gamma_1 q}) + \bar{E}_2(1 - e^{-\gamma_2 q})e^{-\gamma_1 q} + \bar{E}_1(1 - e^{-\gamma_1 q})e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)q}}{q^2(\bar{a}_2 q^2 + \bar{a}_2 q + a_0)}.$$

де $\gamma_1 = \frac{t_1}{T}$, $\gamma_2 = \frac{t_2}{T}$, $\bar{a}_2 = \frac{a_2}{T^2}$, $\bar{a}_1 = \frac{a_1}{T^2}$.

Ця функція має такі полюси:

$$q_{1,2} = 0, \quad q_{3,4} = c + jb. \quad \text{де } c = -\frac{\bar{a}_1}{2\bar{a}_2}, \quad b = \frac{1}{2\bar{a}_2} \sqrt{4a_0\bar{a}_2 - \bar{a}_1^2}.$$

Лишки для полюсів:

$$A_1 = \frac{1}{a_0}, \quad A_2 = -\frac{\bar{a}_1}{a_0}, \quad A_3 = \frac{1}{(c + jb)^2 2jb}, \quad A_4 = \frac{-1}{(c - jb)^2 2jb}.$$

Дискретна передаточна функція розімкненої системи:

$$W_p^*(z, \varepsilon) = Z_M \left\{ \frac{K_c(q)}{q} \right\} \delta_1 K_p(z) \frac{1}{T_i} \delta_2 K_{ЦАП}(z) K_{cy} K_{q0}.$$

Для інтегрального регулятора в результаті модифікованого Z-перетворення отримуємо:

$$W_p^*(z, \varepsilon) = K_0 \left[A_1 \frac{M_{A1}^*(z, \varepsilon)}{z-1} + A_2 + 2A_0 \frac{z^2 M_2^*(z, \varepsilon) + z^2 M_1^*(z, \varepsilon) + M_0^*(z, \varepsilon)}{z^2 + 2ze^c \cos b + e^{+2c}} \right], \quad (4)$$

де $K_0 = \frac{a_0 T \delta_1 K_{cy} K_{q0}}{T_i}$, $\gamma_1 + \gamma_2 \leq \varepsilon \leq 1$.

$$A_0 = \frac{1}{\sqrt{16c^2 b^4 - 4a^2(c^2 - b^2)^2}}, \quad M_{A1}^*(z, \varepsilon) = \bar{E}_1 [1 - \varepsilon + z(\varepsilon - \gamma_2)] + \bar{E}_2 z \gamma_2;$$

$$M_2^*(z, \varepsilon) = \bar{E}_1 e^{+c\varepsilon} \cos(b\varepsilon + \varphi) + (\bar{E}_2 - \bar{E}_1) e^{+c(\varepsilon - \gamma_1)} \cos[b(\varepsilon - \gamma_1) + \varphi] + (\bar{E}_2 - \bar{E}_1) e^{+c(\varepsilon - \gamma_1 - \gamma_2)} \cos[b(\varepsilon - \gamma_1 - \gamma_2) + \varphi]$$

$$M_1^*(z, \varepsilon) = \bar{E}_1 e^{+c(\varepsilon - \gamma_1)} \cos[b(\varepsilon - \gamma_1) + \varphi] + (\bar{E}_1 - \bar{E}_2) e^{+c(\varepsilon - \gamma_1 + 1)} \cos[b(\varepsilon - \gamma_1 - 1) + \varphi] +$$

$$+ [\bar{E}_2 - \bar{E}_1] e^{+c(\varepsilon - \gamma_1 - \gamma_2 + 1)} \cos[b(\varepsilon - \gamma_1 - \gamma_2 - 1) + \varphi] + \bar{E}_1 \left[e^{+c(\varepsilon + 1)} \cos(b(\varepsilon - 1) + \varphi) - e^{+c(\varepsilon + 1)} \cos(b\varepsilon + \varphi) \right];$$

$$M_0^*(\varepsilon) = \bar{E}_1 e^{+c(\varepsilon + 1)} \cos[b(\varepsilon - 1) + \varphi]; \quad \gamma = \arctan \frac{c^2 - b^2}{2cb}.$$

Дискретна передаточна функція розімкненої системи слідкування на момент спрацювання імпульсного елемента:

$$W_p^*(z, 0) = Z^{-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 1} W_p^*(z, \varepsilon).$$

З врахуванням (4) маємо:

$$W_p^*(z, 0) = K_0 \left[\frac{A_1}{z} + \frac{M_{A1}^*(z, 1)}{z(z-1)} + 2A_0 \frac{z^2 M_2^*(z, 1) + z M_1^*(z, 1) + M_0^*(z, 1)}{z(z^2 - 2ze^{-c} \cos b + e^{-2c})} \right] \quad (5)$$

Дискретна передаточна функція системи слідкування за помилкою:

$$W_{II}^*(z, 0) = \frac{1}{1 + W_p^*(z, 0)}$$

З врахуванням (5) отримаємо:

$$W_{II}^*(z, 0) = \frac{z(z-1)B^*(z, 0)}{(z-1)B^*(z, 0)K_0 \left[A_2(z-1)B^*(z, 0) + A_1 M_{A1}(z, 0)B^*(z, 0) + (z-1)F^*(z, 0) \right]}, \quad (6)$$

де $B^*(z, 0) = z^2 - 2ze^{-c} \cos b + e^{-2c}$, $F^*(z, 0) = z^2 M_2^*(z, 0) + z M_1^*(z, 0) + M_0^*(z, 0)$

Закон слідкування $U_s^*(t) = \alpha t$ - лінійний його Z -зображення для відносного

$\bar{t} = \frac{t}{T}$ часу є таким: $U_s^*(z, 0) = \frac{\alpha}{(z-1)^2}$.

На виході елемента порівняння Z зображенням помилки $\Delta^*(z, 0) = \frac{\alpha}{(z-1)^2} W_{II}^*(z, 0)$

З врахуванням (6) маємо;

$$\Delta^*(z, 0) = \frac{\alpha z B^*(z, 0)}{(z-1) \left[(z-1)B^*(z, 0) + K_0 \left[A_2(z-1)B^*(z, 0) + A_1 M_{A1}(z, 0)B^*(z, 0) + (z-1)F^*(z, 0) \right] \right]}.$$

Для сталого режиму оригінал похибки слідкування

$$\Delta_{CT}^*(n, 0) = (z-1) \lim_{z \rightarrow 1} \Delta^*(z, 0) = \frac{\alpha B^*(1, 0)}{K_0 A_1 M_{A1}^*(1, 0) B^*(1, 0)}, \text{ де: } M_{A1}^*(1, 0) = \bar{E}_1 [(1-\gamma_2)] + \bar{E}_2 \gamma_2$$

Переходячи до реального часу $t = \bar{t}T$, та враховуючи, що $\delta_1 = \frac{1}{\delta_2}$, маємо значення

сталой похибки слідкування для моменту спрацювання імпульсного елемента:

$$\Delta^*(nT) = \frac{\alpha T_n}{K_{cy} a_0 K_{q0} \left[\bar{E}_1 [(1-\gamma_2)] + \bar{E}_2 \gamma_2 \right]}, \quad (7)$$

де $\bar{E}_2 > \bar{E}_1; \bar{E}_2 < 1$.

З (7) видно що похибку слідкування суттєво збільшують показники реальної форми напруги на виході АІН ($\gamma_2, \bar{E}_1, \bar{E}_2$).

3. Похибка слідкування без врахування реальної форми напруги на виході АІН.

Якщо аналіз похибки слідкування проводити без врахування реальної форми вихідної напруги АІН, а проводити аналіз за основною гармонікою, то коефіцієнт передачі АІН буде:

$$K_{AII} = \frac{U_{q1}}{U_{cy}}, \text{ де } U_{q1} \text{ діюче значення основної гармоніки на виході АІН.}$$

Передаточна функція розімкненої системи слідкування:

$W_p^*(z, \varepsilon) = \frac{K_0}{p(p^2 a_2 + p a_1 + a_0)}$ – для інтегрального регулятора, як у попередньому розгляді, де $K_0 = \frac{K_{cy} K_{AIIH} d_0 K_{\partial o}}{T_I}$.

Передаточна функція системи слідкування за помилкою:

$$W_{II}(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{p(p^2 a_2 + p a_1 + a_0)}{p(p^2 a_2 + p a_1 + a_0) + K_0}.$$

Якщо слідкування реалізується за лінійним законом $U_3(t) = \alpha t$, зображення якого $U_3(p) = \frac{\alpha}{p^2}$, то зображення помилки $\Delta(p) = \frac{\alpha}{p^2} = \frac{p(p^2 a_2 + p a_1 + a_0)}{p(p^2 a_2 + p a_1 + a_0) + K_0}$.

Стале значення помилки

$$\Delta_{CT} = p \lim_{p \rightarrow 0} \Delta p = \frac{\alpha T_I}{K_{cy} K_{AIIH} d_0 K_{\partial o}} \quad (8)$$

Якщо порівняти (7), (8), то очевидно, що вони відрізняються між собою двома показниками: у (7) у знаменнику множник $\overline{E}_1(1-\gamma) + \overline{E}_2\gamma_2 < 1$ а у (8) у знаменнику множник $K_{AIIH} > 1$. Завжди помилка з врахуванням пульсації буде вище ніж без їх врахування, навіть для випадку $\overline{E}_1 = \overline{E}_2 = 1$, коли $\gamma_2 = 1$, чинник $\overline{E}_1(1-\gamma) + \overline{E}_2\gamma_2 = 1$

Розглянутий варіант системи слідкування з пропорційно-інтегральним регулятором має недолік його неможливо налаштувати на процес кінцевої тривалості. Таку можливість надає пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор.

4. Слідкуючий електропривід з ПІ регулятором.

Якщо в системі реалізовано пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ), то він описується рівнянням:

$y = K_p(x + \frac{1}{T_I} \int x dt)$. Для моменту часу, що відповідає n-тому періоду, вихідний сигнал регулятора

$$y_n = K_p(x_n + \frac{1}{T_I} \int x_n dt) = K_p(x_{n-1} + \frac{x_n T}{T_I}) \quad (9)$$

а для моменту

$$n-1. \quad y_{n-1} = K_p(x_{n-1} + \frac{1}{T_I} \int x_{n-1} dt) = K_p(x_{n-1} + \frac{x_n 2T}{T_I}). \quad (10)$$

Якщо взяти різницю між (9) (10), то отримаємо таке різнічне рівняння:

$$y_n - y_{n-1} = K_p(x - x_{n-1}) + \frac{K_p T}{T_I} x_n, \quad (11)$$

де K_p – коефіцієнт передачі регулятора, T_I – стала інтегрування, x – сигнал на вході регулятора – помилка системи слідкування, y – вихідний сигнал регулятора.

Піддаючи (11) перетворенню Лапласа маємо:

$$y_n \frac{1 - e^{-pT}}{p} = K_p x_n \frac{1 - e^{-pT}}{p} + \frac{x_n T K_p}{T_I p},$$

звідки

$$y_n = K_p x_n + \frac{x_n T}{T_I} K_p \frac{1}{1 - e^{-pT}} = \frac{x_n}{1 - e^{-pT}} \left(K_p - K_p e^{-pT} + \frac{TK_p}{T_I} \right) = x_n \frac{1}{1 + C_1 e^{-pT}} (d_0 + d_1 e^{-pT}) \quad (12)$$

де $d_0 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_I} \right)$, $d_1 = -K_p$, $C_1 = -1$.

Для (12) справедлива структурна схема цифрового ПІ-регулятора, рис. 3.

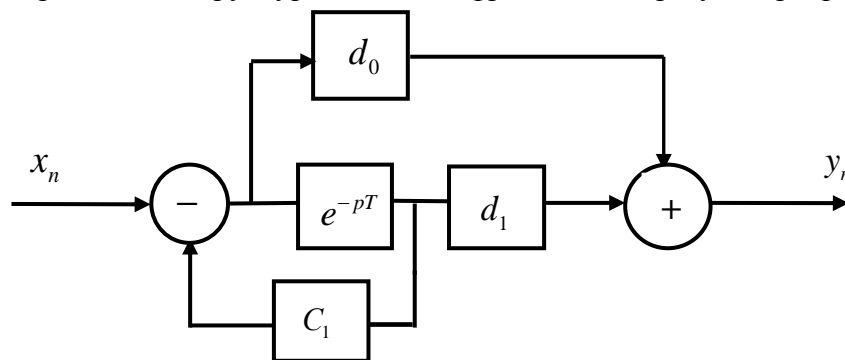


Рис. 3. Структурна схема цифрового ПІ регулятора

Структурній схемі рис. 3 відповідає така дискретна передаточна функція:

$$K_{III}(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = K_p \frac{d_0 z + d_1}{z - 1}$$

У системі (рис. 1) помилку обчислює фазовий дискримінатор (ФД), що дозволяє реалізувати принцип фазового автоналаштування частоти (ФАНЧ). Знайдемо похибку слідкування у сталому режимі. Дискретна передаточна функція системи слідкування:

$$W_{p2}^*(z, \varepsilon) = Z_M \left\{ \frac{K_c(q)}{q} \right\} \delta_1 \delta_2 K_{ЦАП}(z) K_{III}(z) K_{cy} K_{q0},$$

де $K_{ЦАП}(z) = \frac{z-1}{qz}$, його полюс $q = 0$ враховано, як і в попередньому випадку, у передаточній функції силової складової електроприводу; $K_{III}(z) = K_p \frac{zd_0 + d_1}{z-1}$ – передаточна функція ПІ регулятора. У результаті модифікованого Z-перетворення маємо:

$$W_{p2}^*(z, \varepsilon) = K_{02} \left[A_1 + \frac{M_{A1}^*(z, \varepsilon)}{z-1} + A_2 + 2A_0 \frac{z^2 M_{2}^*(\varepsilon) + z M_{1}^*(\varepsilon) + M_{0}^*(\varepsilon)}{z^2 - 2ze^c \cos b + e^{2c}} \right] \frac{d_0 z + d_1}{z},$$

де $K_{02} = K_0 K_p$.

Передатна функція розімкнутої системи в момент спрацювання імпульсного елемента

$$W_{p2}^*(z, 0) = Z^{-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 1} W_p^*(z, \varepsilon). \quad (13)$$

Використовуючи отриманий результат і реалізуючи таку ж процедуру, як і у випадку системи з інтегральним регулятором, маємо значення сталої помилки системи слідуючого електроприводу з ПІ регулятором:

$$\Delta^*(kT) = \frac{\alpha T_I}{K_{cy} a_0 K_{q0} \left[\overline{E_1} [(1 - \gamma_0)] + \overline{E_2} \gamma_2 \right] (d_0 + d_1)}.$$

Очевидно, що похибка слідкування в системі з ПІ-регулятором у $(d_0 + d_1)$ разі менше, ніж у системі з інтегральним регулятором, до того ж у такій системі можна реалізувати процес кінцевої тривалості. Розглянемо реалізацію такої можливості [10; 11; 12; 13].

5. Процес кінцевий тривалості в слідкуючій системі з ПІ регулятором.

Передаточна функція (13) розімкненої системи в момент спрацювання імпульсного елемента після відповідних перетворень:

$$W_{p2}^*(z, 0) = K_{02} \frac{z^4 N_4^*(1) + z^3 N_3^*(1) + z^2 N_2^*(1) + z N_1^*(1) + N_0^*(1)}{z^4 - z^3 (2e^c \cos b + 1) + z^2 (e^{2c} + 2e^{2c} \cos b) - ze^{2c}}, \quad (14)$$

де

$$N_4^*(1) = [A_2 \bar{E}_1 d_0 + 2d_0 A_0 M_2^*(1)];$$

$$N_3^*(1) = [d_1 - d_0 - 2d_0 e^c \cos b] A_2 \bar{E}_1 + M_{A1}^*(1) d_1 + 2A_0 [d_0 M_1^*(1) - 2d_0 M_2^*(1) + M_2^*(1) d_1];$$

$$N_2^*(1) = -2M_{A1}^*(1) d_0 e^c \cos b + A_2 \bar{E}_1 [d_0 e^c \cos b - d_1 + 2d_0 e^c \cos b] + 2A_0 [d_0 M_2^*(1) - d_0 M_1^*(1) + d_0 M_0^*(1) - 2d_1 M_2^*(1) + d_1 M_1^*(1)];$$

$$N_1^*(1) = M_{A1}^*(1) [d_0 e^c - 2d_1 e^c \cos b] + A_2 \bar{E}_1 [d_1 e^{2c} + 2d_1 e^c \cos b - d_0 e^c] + 2A_0 [d_1 M_2^*(1) - d_0 M_0^*(1) - d_1 M_1^*(1) + M_0^*(1) d];$$

$$N_0^*(1) = M_{A1}^*(1) d_1 e^{2c} - A_2 \bar{E}_1 d_1 e^{2c} - 2A_0 M_0^*(1) d.$$

Дискретна передаточна функція замкненої системи слідкування з ПІ регулятором у момент спрацювання імпульсного елемента:

$$W_3^*(z, 0) = \frac{W_{p2}^*(z, 0)}{1 + W_{p2}^*(z, 0)}.$$

З врахуванням (14) маємо:

$$W_3^*(z, 0) = K_{02} \frac{z^4 N_4^*(1) + z^3 N_3^*(1) + z^2 N_2^*(1) + z N_1^*(1) + N_0^*(1)}{z^4 (1 + N_4^*(1) K_{02}) - z^3 (N_3^*(1) K_{02} - 2e^c \cos b - 1) + z^2 (e^{2c} + 2e^c \cos b + N_2^*(1) K_{02}) - z (N_1^*(1) K_{02} - e^{2c}) + K_{02} N_0^*(1)} \quad (15)$$

У системі з передаточною функцією (15) можна завершити процес за чотири інтервали, що вона буде такою:

$$W_3^*(z, 0) = K_{02} \frac{z^4 N_4^*(1) + z^3 N_3^*(1) + z^2 N_2^*(1) + z N_1^*(1) + N_0^*(1)}{z^4 (1 + N_4^*(1) K_{02})}. \quad (16)$$

Дискретна передаточна функція замкненої системи слідкування буде мати вигляд (16) якщо виконати умови:

$$N_3^*(1) K_{02} - 2e^c \cos b - 1 = 0 \quad (17)$$

$$e^{2c} + 2e^c \cos b + K_{02} N_2^*(1) = 0 \quad (18)$$

$$N_1^*(1) K_{02} - e^{2c} = 0 \quad (19)$$

$$K_{02} N_0^*(1) = K_{02} [M_{A1}^*(1) d_1 e^{2c} - A_2 \bar{E}_1 d_1 e^{2c} - 2A_0 M_0^*(1) d_1] = 0, \text{ тобто сума}$$

$$M_{A1}^*(1) e^{2c} - A_2 \bar{E}_1 d_1 e^{2c} - 2A_0 M_0^*(1) = 0 \quad (20)$$

З урахуванням значень M_{A1}^* , $M_0^*(1)$ рівняння (20) буде мати такий вигляд:

$$\bar{E}_1 (1 - \gamma_2) + E_2 \gamma_2 - A_2 \bar{E}_1 - 2A_0 \bar{E}_1 \cos \varphi = 0,$$

звідки встановлюється співвідношення між рівнями ступеневих функцій вихідної напруги АІН:

$$\bar{E}_1 = \frac{\bar{E}_2 \gamma_2}{1 - \gamma_2 - A_2 - 2A_0 e^{2c} \cos \varphi} \quad (21)$$

Співвідношення (21) встановлює вплив форми напруги на виході АІН на умови реалізації процесу кінцевої тривалості. Але при цьому не вирішується проблема якісної енергетики, що негативно впливає і на показники динаміки електроприводу. Прямокутна форма напруги

на виході АІН є причиною появи пульсуючого моменту електродвигуна, що негативно впливає на точність слідкування. Найбільшу амплітуду пульсуючого моменту створюють струми п'ятої та сьомої гармонік. Для зменшення негативного впливу на виході АІН можна включити резонансні фільтри, налаштовані на частоту цих гармонік [14]. Таке рішення набагато простіше, ніж широтно-імпульсна модуляція вихідної напруги АІН за синусоїдальним законом. У результаті вирішення системи трьох рівнянь з трьома невідомими (17) ÷ (19), можна знайти параметри налаштування ПІ регулятора (K_{02}, d_0, d_1), що забезпечують оптимальний за довжиною перехідний процес без перерегулювання:

$$H^*(n, 0) = \frac{K_{02}}{1 + K_{02}N_4^*(1)} [N_4^*(1)[n] + N_3^*(1)[n+1] + N_2^*(1)[n-2] + N_1^*(1)[n-3] + N_0^*(1)[n-4]],$$

де $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Висновки. Аналіз, що проведено, показав суттєвий вплив пульсації джерела живлення на головний показник слідкуючого електропривода – точність слідкування. Підвищення точності слідкування бортового авіаційного комплексу запропоновано за рахунок реалізації процесу кінцевої тривалості. Умови реалізації процесів кінцевої тривалості, в слідкуючих електроприводах, що знайдені, є універсальними для широкого кола бортових систем слідкування. Вони дозволяють реалізувати оптимальне управління параметрами палива, що вприскується, повітря, запалення з мінімальними втратами палива. Реалізація процесів кінцевої тривалості необхідно супроводжувати мінімізацією негативного впливу п'ятої та сьомої гармонік на виході інвертора за допомогою резонансних фільтрів.

Список використаних джерел

1. Moir, L. *Military Avionics Systems* / L. Moir, A. Seabridge. – John Wiley Sons; Ltd, 2006. – 520 p.
2. A matrix converter based permanent magnet motor drive for an electro-hydrostatic aircraft actuator / P. W. Wheeler, J. C. Clare, L. Empringham, M. Apap // *IECON'03 : 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (IEEE Cat. No.03CH37468). – Roanoke, VA, USA, 2003. – Vol. 3. – P. 2072-2077. DOI: 10.1109/IECON.2003.1280562.
3. Hybrid Five-Level Active Neutral Point Clamped Inverter for Electric Aircraft Propulsion Drives / M. T. Fard, A. Livingood, J. He, B. Mirafzal // *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – Singapore, 2020. – Pp. 3727-3732. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254908.
4. Hybrid Virtual Coordinate-Driven CBPWM Strategy of Three-Level T-Type NPC Converters for Electric Aircraft Propulsion Applications / F. Guo, Z. Ma, F. Diao, Y. Zhao, P. Wheeler // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2024. – Vol. 71, № 3. – Pp. 2309-2319. DOI: 10.1109/TIE.2023.3266552.
5. Distributed Back-EMF-based Position Self-Sensing of Fault-Tolerant Permanent Magnet Modular Motor Drives for Electrical Aircraft Propulsion / H. Zeng, T. M. Jahns, B. Sarlioglu // *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. – Detroit, MI, USA, 2022. – Pp. 1-8. DOI: 10.1109/ECCE50734.2022.9947626
6. Control of MW-Scale High-Frequency “SiC+Si” Multilevel ANPC Inverter in Pump-Back Test for Aircraft Hybrid-Electric Propulsion Applications / D. Pan, D. Zhang, J. He, C. Immer, M. E. Dame // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – 2021. – Vol. 9, № 1. – Pp. 1002-1012. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.2963890
7. Fault-Tolerant Current Control of Six-Phase Permanent Magnet Motor With Multifrequency Quasi-Proportional-Resonant Control and Feedforward Compensation for Aerospace Drives / J. Xu, S. Guo, H. Guo, X. Tian // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2023. – Vol. 38, № 1. – Pp. 283-293. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3202929.
8. Lower Output Voltage Harmonics With Optimum Switching Angles of Single PV-Source Based Reduced Switch Multilevel Inverter Using BWO Algorithm / R. Mohanty, D. Chatterjee, S. Mohanty, S. Shrivastava // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – Pp. 5054-5065. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3349185.
9. Gonna, G. Control of Two 3-Phase BLDC Motor Drives Using a Five-Leg Inverter / G. Gonna // *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. – Bhubaneswar, India, 2023. – Pp. 1-6, DOI: 10.1109/SeFeT57834.2023.10244837.

10. Discrete Optimization of Weighting Factor in Model Predictive Control of Induction Motor / S. A. Davari, V. Nekoukar, S. Azadi, F. Flores-Bahamonde, C. Garcia, J. Rodriguez // *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. – 2023. – Vol. 4. – Pp. 573-582. DOI: 10.1109/OJIES.2023.3333873.
11. Lago, V. G. Additions to z-transformation theory for sampled-data systems / V. G. Lago // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part II: Applications and Industry*. – 1955. – Vol. 73, № 6. – P. 403-408. doi: 10.1109/TAI.1955.6367090.
12. Denisov, Y. O. Synthesis of the digital regulator of the main contour of the three-circuit system of the linear electric drive of the working body of the mechanism of onboard aviation equipment / Y. O. Denisov, O. I. Denisov, O. O. Bursala // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2021. – № 4. – Pp. 39-45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.05>.
13. Chen, W. -J. Digital Low-Dropout Regulator Design Methodology for Performance Assessment in Early Stages of Integrated Circuit Design / W. -J. Chen, C. -H. Huang // *2021 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*. – Taipei, Taiwan, 2021. – Pp. 1-4. DOI: 10.1109/IFEEEC53238.2021.9661996.
14. Geng, W. Analysis and Experimental Verification of a Conventional Inverter With Output LC Filter to Drive Ironless Stator Axial-Flux PM Motor / W. Geng, Z. Zhang, Q. Li // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2021. – Vol. 7, № 4. – Pp. 2600-2610. DOI: 10.1109/TTE.2021.3062090.

References

1. Moir, L., Seabridge, A. (2006). *Military Avionics Systems*. John Wiley Sons, Ltd.
2. Wheeler, P.W., Clare, J.C., Empringham, L., Apap, M. (2003). A matrix converter based permanent magnet motor drive for an electro-hydrostatic aircraft actuator. *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (IEEE Cat. No.03CH37468), Roanoke, VA, USA (pp. 2072-2077, Vol. 3). DOI: 10.1109/IECON.2003.1280562.
3. Fard, M.T., Livingood, A., He, J., Mirafzal, B. (2020). Hybrid Five-Level Active Neutral Point Clamped Inverter for Electric Aircraft Propulsion Drives. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore*, 3727-3732. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254908.
4. Guo, F., Ma, Z., Diao, F., Zhao, Y., Wheeler, P. (March 2024). Hybrid Virtual Coordinate-Driven CBPWM Strategy of Three-Level T-Type NPC Converters for Electric Aircraft Propulsion Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(3), 2309-2319. DOI: 10.1109/TIE.2023.3266552.
5. Zeng, H., Jahns, T.M., Sarlioglu, B. (2022). Distributed Back-EMF-based Position Self-Sensing of Fault-Tolerant Permanent Magnet Modular Motor Drives for Electrical Aircraft Propulsion. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 1-8). Detroit, MI, USA. DOI: 10.1109/ECCE50734.2022.9947626.
6. Pan, D., Zhang, D., He, J., Immer, C., Dame, M.E. (2021). Control of MW-Scale High-Frequency “SiC+Si” Multilevel ANPC Inverter in Pump-Back Test for Aircraft Hybrid-Electric Propulsion Applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(1), 1002-1012. doi: 10.1109/JESTPE.2020.2963890.
7. Xu J., Guo, S., Guo, H., Tian, X. (2023). Fault-Tolerant Current Control of Six-Phase Permanent Magnet Motor With Multifrequency Quasi-Proportional-Resonant Control and Feedforward Compensation for Aerospace Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(1), 283-293. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3202929.
8. Mohanty, R., Chatterjee, D., Mohanty, S., Shrivastava, S. (2024). Lower Output Voltage Harmonics With Optimum Switching Angles of Single PV-Source Based Reduced Switch Multilevel Inverter Using BWO Algorithm. *IEEE Access*, 12, 5054-5065. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3349185.
9. Gonna, G. (2023). Control of Two 3-Phase BLDC Motor Drives Using a Five-Leg Inverter. *2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. Bhubaneswar, India (pp. 1-6). DOI: 10.1109/SeFeT57834.2023.10244837.
10. Davari, S.A., Nekoukar, V., Azadi, S., Flores-Bahamonde, F., Garcia, C., Rodriguez, J. (2023). Discrete Optimization of Weighting Factor in Model Predictive Control of Induction Motor. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 4, 573-582. DOI: 10.1109/OJIES.2023.3333873.
11. Lago, V.G. (1955). Additions to z-transformation theory for sampled-data systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, 73(6), 403-408. DOI: 10.1109/TAI.1955.6367090.

12. Denisov, Y.O., Denisov, O.I., Bursala, O.O. (2021). Synthesis of the digital regulator of the main contour of the three-circuit system of the linear electric drive of the working body of the mechanism of onboard aviation equipment. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, 39-45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.05>.

13. Chen, W.-J., Huang, C.-H. (2021). Digital Low-Dropout Regulator Design Methodology for Performance Assessment in Early Stages of Integrated Circuit Design. *2021 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)* (pp. 1-4). Taipei, Taiwan. DOI: 10.1109/IFEEEC53238.2021.9661996.

14. Geng, W., Zhang, Z., Li, Q. (2021). Analysis and Experimental Verification of a Conventional Inverter With Output LC Filter to Drive Ironless Stator Axial-Flux PM Motor. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(4), 2600-2610. DOI: 10.1109/TTE.2021.3062090.

Отримано 01.03.2024

UDC 629.7:621.314.572

Yuri Denisov¹, Vitalii Skuhariiev²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: den71ltd@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>

ResearcherID: [G-1144-2016](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964). **Scopus Author ID:** [56338219200](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964)

²PhD Student of Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: v.skugarev88@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-2538-6997>. **ResearcherID:** [JOK-0150-2023](https://orcid.org/0009-0008-2538-6997)

THE INFLUENCE OF PULSATIONS OF AN AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER ON THE PHASE OF THE OPERATING ORGAN OF THE ON-BOARD AVIATION FOLLOWING SYSTEM

On board an aircraft, an automatic control system ensures optimal aircraft engine operation. Its functions are related to monitoring the current parameters of the aircraft engine operating modes, their indication and control of individual working bodies that provide fuel, air and ignition supply according to the commands of the onboard computer. These commands are executed by automated low-power electric drives that are part of the systems of the relevant executive bodies that monitor the parameters of the engine's operating modes. Modern on-board electric drives are based on brushless motors that operate in DC mode, or in synchronous mode as an AC machine. These electric drives follow the specified laws of change of certain parameters, such as the phase position of the working bodies, which ensure the specified operating modes of the aircraft engine. The on-board electric drive of the tracking system is powered by the battery through an autonomous voltage inverter if the collectorless electric machine operates in synchronous mode, or in collector mode if it operates as a DC machine. The accuracy of the implementation of the specified tracking laws is the main indicator of such systems. This indicator is influenced by many factors, one of the main ones being the supply voltage fluctuations, which are a consequence of the discrete mode in the inverter operation, which raises the urgent problem of analysing their impact on the accuracy of the tracking laws. Given the significant impact of the inverter output voltage fluctuations on the accuracy of the tracking process by the executing electric drive, there is an urgent problem of assessing the level of its influence and finding ways to minimise it. An analysis of modern publications on the subject of the study has shown that in the process of developing tracking electric drives, their main accuracy indicator is estimated by the fundamental harmonic of the supply voltage without taking into account its actual shape. This approach greatly simplifies the analysis of the processes of the AC drive system powered by an inverter. However, the real rectangular shape of the motor supply voltage affects the smoothness of its rotor rotation, which worsens the accuracy of the tracking process as a result of the appearance of a pulsating torque. The reason for this is the result of the interaction of the fundamental harmonic field with the fields of higher harmonic currents; the largest amplitude of the pulsating torque is created by the currents of the fifth and seventh harmonics, and in general, the largest amplitude of torque pulsation in the rated load zone is up to 10% of the rated torque. This raises the urgent problem of studying the effect of voltage fluctuations at the inverter output on the error of the electric drive following the law of change of the corresponding parameter in the aircraft engine operation mode control system. The main purpose of the publication is to analyse the error of tracking the law of phase change of the actuator in the aircraft engine control system and to find ways to minimise it. As a result of the study, a comparative assessment of the tracking error was obtained, taking into account the real form of the motor supply voltage and taking into account only the fundamental harmonic the system was set up for a finite duration process. The comparison result showed a significant negative impact of the real supply voltage waveform on the tracking error.

Key words: aircraft; tracking electric drives; autonomous voltage inverter; supply voltage fluctuations; transient processes of finite duration.

Fig.: 3. References: 14.

Валерій Кирик¹, Володимир Халіков², Анатолій Жерносков³, Олександр Шатан⁴

¹доктор технічних наук, професор кафедри електричних мереж та систем
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: vkiryk@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

²доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший викладач кафедри електричних мереж та систем
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: xvavlad@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>. **Scopus Author ID:** [55327787500](https://orcid.org/0000-0003-1691-5005)

³ доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України (Київ, Україна)
E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>. **Scopus Author ID:** [6506774085](https://orcid.org/0000-0002-6404-2221)

⁴науковий співробітник
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона Національної академії наук (Київ, Україна)
E-mail: shatanaf57@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

**КОМУТАЦІЙНИЙ СТРУМ ПЕРВИННОЇ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА
ПРИ ВАРІАЦІЯХ СТРУМУ ЙОГО ХОЛОСТОГО ХОДУ**

У роботі розглянуто аспекти перехідних процесів, що виникають при комутації силових трансформаторів. Показано, що увімкнення трансформатора супроводжується суттєво значимими, проте в подальшому спадними в часі сплесками струму в первинній обмотці. При цьому більшим значенням сплесків струму відповідають менші величини холостого ходу трансформатора і навпаки, його значні величини сприяють пропорційальному зменшенню такого роду комутаційних проявів у вхідному струмі трансформатора. Наголошено, що при повторно-короткочасному режимі комутації трансформатора, збільшення величини струму холостого ходу трансформатора, яке у зварювальних установках спрямовується на стабілізацію горіння дуги змінного струму, також спричиняє ще один позитивний ефект – пропорційальне зменшення сплесків струму намагнічування в його первинній обмотці.

Ключові слова: трансформатор; магнітний потік; насичення магнітопроводу; холостий хід; ключ; комутація; перехідний процес; моделювання.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Одним із проблемних режимів електротехнічних установок значної потужності електроенергетичного або технологічного призначення, є комутація трансформаторів. Цим часто визначається функціональність такого роду установок чи пристроїв. Але комутаціям, незалежно від їх фазності, притаманні екстремальні перехідні процеси, у першу чергу в формі сплесків струму споживання, що спричиняються насиченням магнітопроводу в момент увімкнення первинної обмотки wI трансформатора до мережі живлення [1]. Для однофазних трансформаторів (ОФТ) такого роду перехідних процесів можна уникнути, наприклад, при нульовому залишковому магнітному потоці осердя ($\Phi_z = 0$) і в такому разі найбільш сприятливим для увімкнення ОФТ є момент досягнення напругою амплітуди (umI). І навпаки, через виникаюче максимальне значення струму намагнічування, при $umI = 0$, момент увімкнення ОФТ є найбільш не сприятливим. Проте залежно від різного роду обставин ці процеси мають свою специфіку. Наприклад, при розгляді процесів у трифазних трансформаторах, як правило, підкреслюється [1], що при їх увімкненні завжди необхідно очікувати сплески струмів намагнічування, оскільки хоча б в одній із трьох фаз напруга в момент увімкнення все ж буде досить близькою до нуля. Тобто умови для увімкнення обмотки трансформатора на цю фазу будуть несприятливі і т. п. Проте зменшення екстремальних сплесків струму в первинній обмотці трансформатора і пом'якшення їх негативного впливу можна досягти й іншими засобами.

Постановка проблеми. При синхронному й асинхронному увімкненні ОФТ, сплески струму в його первинних обмотках і, в тому числі й у режимах, близьких до мінімуму навантаження, можуть перевищувати в кілька разів їхній номінальний струм. Такі про-

цеси є небажаними з погляду енергоефективності, електромагнітної сумісності, надійності трансформатора, функціонування систем захисту тощо. Проте не достатньо виясненими залишаються питання взаємозв'язку їх величини із магнітними властивостями осердя трансформатора. Останні можуть залежати, як від властивостей матеріалу осердя, так і від його конструктивного виконання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання трансформаторів на частоті струму мережі живлення залишається превалюючим у сфері в електроенергетики і достатньою широким в інших галузях промисловості, зокрема і в устаткуванні призначеному для зварювання металів [2-5]. Тут наявна низка переваг, наприклад, трансформаторні джерела живлення зварювальної дуги генерують у мережу менший рівень вищих гармонік струму, чим інверторні джерела, вони суттєво простіші в обслуговуванні, більш надійні, у т. ч. завдяки меншій кількості силових компонентів. Однак, як і в електроенергетиці, режими комутації, трансформаторних джерел струму залишаються предметом досліджень [6-8].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відомо, що величина магнітного опору осердя трансформатора R_m визначається кривою намагнічування у координатах I_0 , (неробочого струму або холостого ходу обмотки) Φ (магнітного потоку осердя), що показано у відносних одиницях на рис. 1. При цьому середньому, круто падаючому відрізку (ab), апроксимуючому відрізку для кривої намагнічування відповідає найбільше значення R_m , і таким чином найменшій величині I_0 . Нахил пологих крайніх відрізків (ac , bd), щодо нахилу середнього показує, наскільки зменшується величина R_m при переході потоком точок перегину (a – при позитивних значеннях Φ , коли $\Phi = +\Phi_m = 1$; b – при негативному Φ , коли $\Phi = -\Phi_m = -1$) кривої намагнічування. При такому спрощеному виді апроксимації не враховується вплив залишкового магнітного потоку Φ_z і реальної нелінійності вказаного прямого відрізка ab кривої намагнічування, на перехідні процеси. Проте цього спрощеного представлення достатньо для того, щоб оцінити характер процесів при зменшенні R_m , тобто збільшенні величини I_0 , а графічна ілюстрація такого прикладу збільшення I_0 відображена на рис. 1 штриховою лінією.

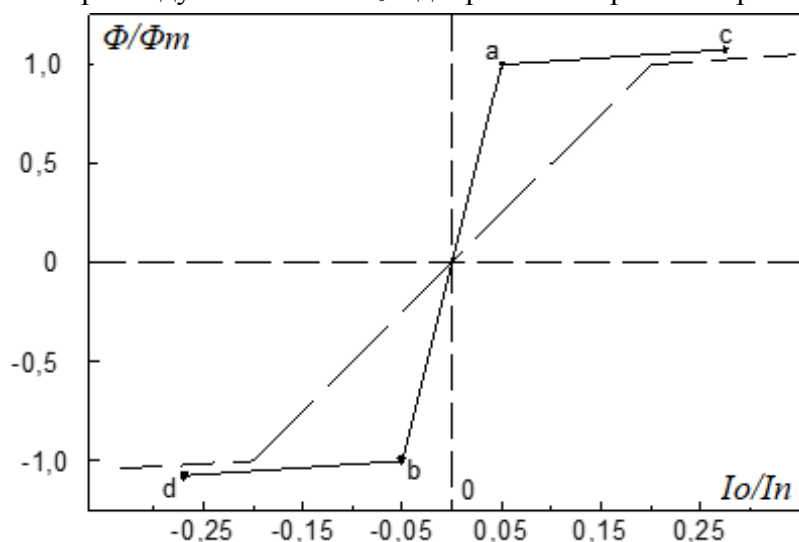


Рис. 1. Варіація апроксимованої кривої намагнічування осердя трансформатора

Належний аналіз подібного роду електромагнітних процесів став можливим, лише за використання методів чисельного обчислення з подальшим розвитком методології дослідження в частині комп'ютерного моделювання. Досвід, у тому числі й авторів, у цьому напрямку показав, що найбільш доцільним є застосування програмного пакета

MATLAB/Simulink, тобто апарату об'єктно-орієнтованого імітаційного візуального моделювання [9-11]. Реалізацію моделі трансформатора в такому середовищі, для випадку комутації його первинної обмотки, наведено на рис. 2.

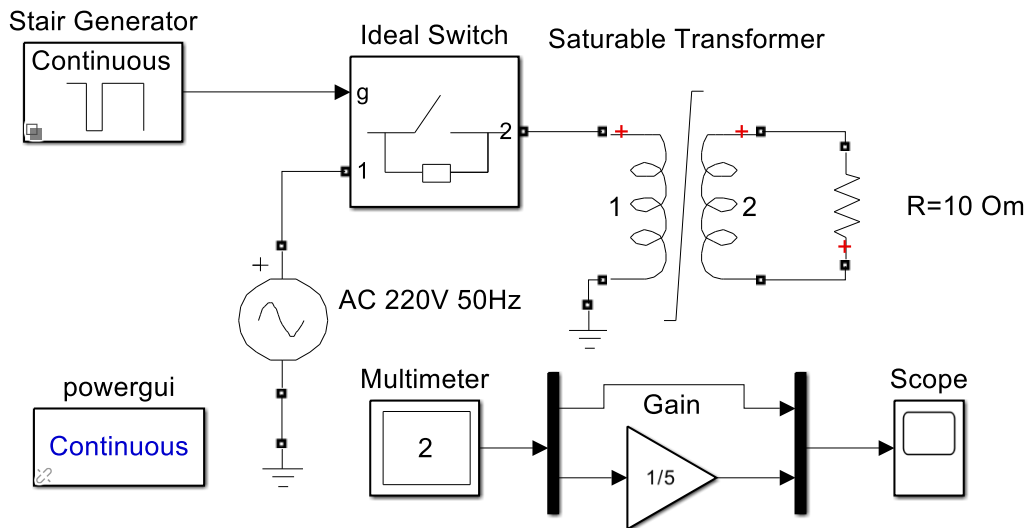
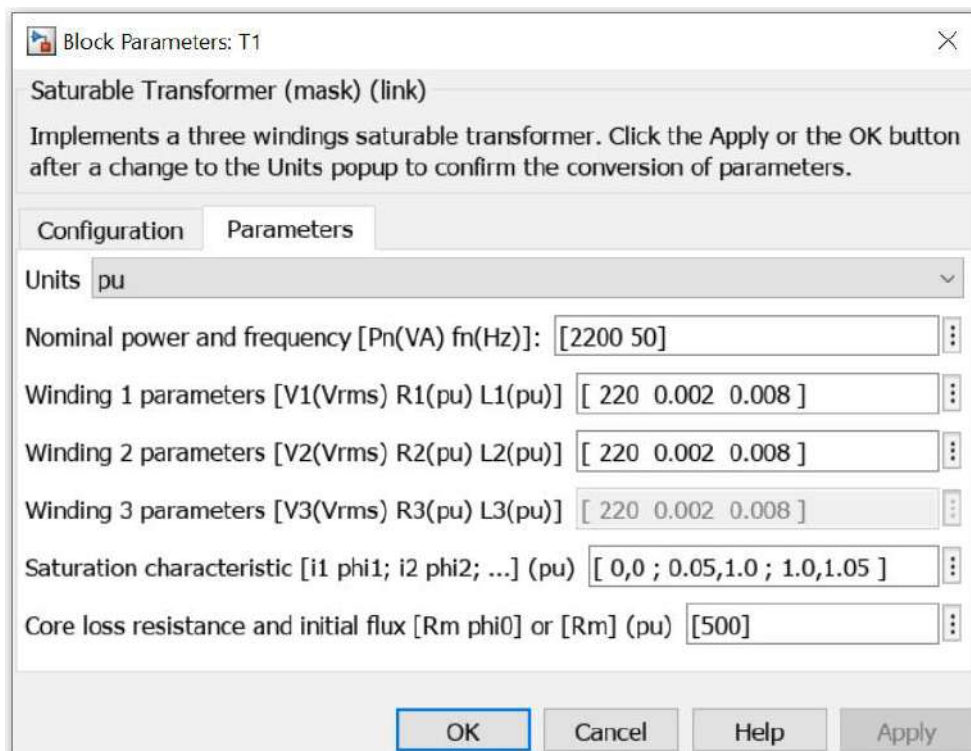
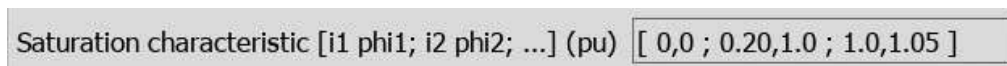


Рис. 2. Модель комутації трансформатора

На вкладці Block Parameters імітаційної моделі трансформатора можна задати належні параметри й апроксимувати форму кривої намагнічування осердя (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Параметри імітаційної моделі трансформатора

а – вікно зміни параметрів; б – варіант задання характеристики намагнічування

Наприклад, для характеристики намагнічування наведеної на рис. 1 неперервною лінією, її параметри можуть бути представлені в моделі трансформатора наступним чином: Saturation characteristic [0,0; 0.05, 1.0; 1.0, 1.05] (рис. 3, а) при відношенні I_0 до номінального струму I_n , первинної обмотки $I_0/I_n \approx 2,5\%$ [11].

Графічно, збільшення I_0 до 20% від I_n , одержують належним нахилом основного функціонального відрізка $a-b$ (рис. 1), який і визначає форму кривої намагнічування осердя, що показано штриховою лінією. Для реалізації такого роду варіації, досить зміни лише одного значення ($i_2, \phi_2 - 0,2, 1,0$) у вікні Saturation characteristic, як показано на рис. 3, б.

Для силових трансформаторів електроенергетичного призначення 0,66...500 кВ відношення I_0/I_n , як правило складає 0,35...7%, при стійкій тенденції до зменшення його значення із підвищенням їх потужності та збереженні конструктивної однотипності. Для трансформаторів технологічного призначення і особливо зварювального обладнання часто є характерним збільшене відношення I_0/I_n , що виконується, наприклад, для підвищення стійкості горіння дуги, або поліпшення її запалення на початковому етапі технологічного процесу.

Метою статті є аналіз екстремальності комутаційних сплесків струму первинної обмотки трансформатора і їх залежності від відносного значення струму холостого ходу обмотки, який своєю чергою залежить від нахилу основного функціонального відрізка кривої намагнічування осердя трансформатора відповідного його стаціонарному режиму роботи.

Виклад основного матеріалу. Для одержання необхідних даних щодо процесів комутації використаємо модель (рис. 2). Очевидно, що в ній комутатором виступає ідеальний ключ (*Ideal Switch*), його керуючим елементом є блок *Stair Generator*, що в сумі дозволяє одержати належну синхронізацію моменту увімкнення із напругою мережі U_1 , одержану з блоку *AC 220V 50Hz*. Часові параметри функціонування комутатора на фоні кривої напруги мережі живлення u_1 видно із рис. 4, де перше відключення первинної обмотки $w1$ відбувається в момент t_1 досягнення напругою амплітудного значення (0,02 с), чим забезпечується нульове значення магнітного потоку осердя на момент t_2 наступного приєднання обмотки $w1$. Як видно з рис. 2 графічне виведення форми процесів реалізовано за допомогою блоків *Multimeter* і *Scope* і лише для двох параметрів ($i_{1(t)}$, $u_{(t)}$). Останній параметр промасштабовано у відношенні 1 до 5.

Там же (рис. 4) показано струм первинної обмотки $i_{1(t)}$ при повторному увімкненні (при $t_1=0,35$ с) трансформатора після короткочасного його вимкненого стану.

Такий випадок комутації є найбільш несприятливим для трансформатора, оскільки він за нульового значення залишкового магнітного потоку характеризується екстремумом наступного сплеску струму $i_{m(n)}$. Відхилення моменту комутації в ту чи іншу сторону призводить до зменшення величини сплеску струму намагнічування. Тому для передбачуваності (за наявності нульового значення магнітного потоку осердя), вибрано саме такий момент часу (t_2) комутації. В табл. 1 наведені дані результатів моделювання процесів комутації, при варіаціях I_0 і відповідних їх змінах значення параметра (i_2, ϕ_2) налаштувань кривої намагнічування трансформатора.

Як видно з рис. 4, перший сплеск струму $i_{m(1)}$ первинної обмотки трансформатора при повторному увімкненні, по амплітуді (231A) суттєво перевищує стаціонарне значення амплітуди струму властиве його першому увімкненню. При цьому кратність його середнього значення є ще більш значущою, що очевидно при візуальному порівнянні з ампер-секундою площею відповідного стаціонарного півперіоду струму. В наступному позитивному півперіоді напруги буде спостерігатися сплеск струму $i_{m2(1)}$ (217A) уже меншої інтенсивності, відповідно до перехідної складової в даному процесі.

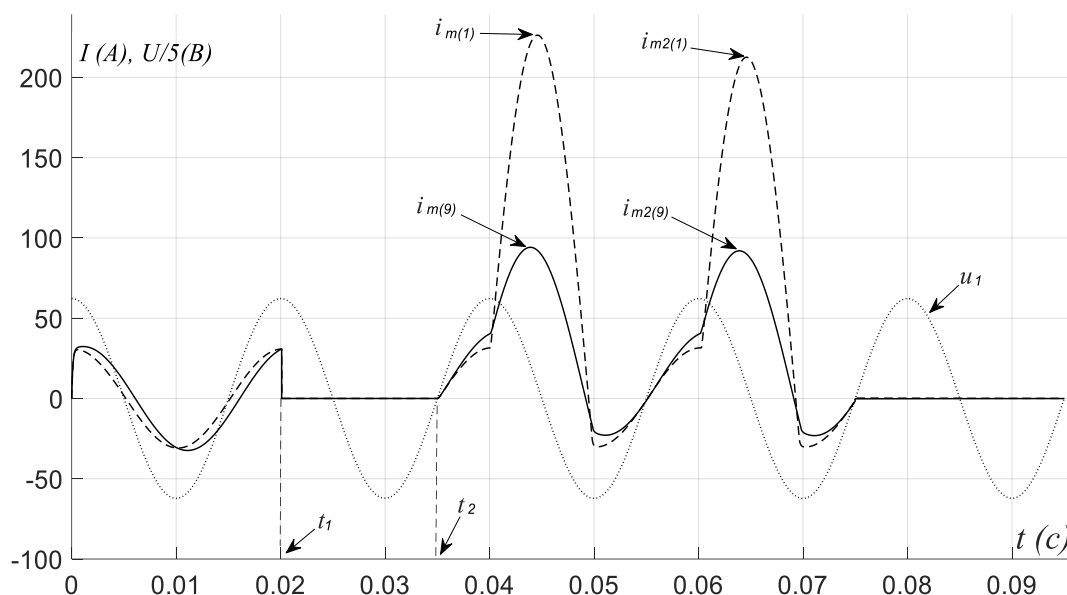


Рис. 4. Комутація при різних I_0 трансформатора і зміни його вхідного струму

Різниця між цими значеннями $i_{m(n)} - i_{m2(n)}$ для даного випадку складає $14A$ і з наростанням I_0 така різниця, як видно з табл. 1 буде зменшуватися. Це наочно видно з наведеного графічного представлення даних (рис. 5), наведених у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання комутації при варіаціях I_0

№ з/н	I_0/I_n (%)	I_0 (A)	i_2, ϕ_2	$i_{m(n)}$ (A)	$i_{m2(n)}$ (A)	$(i_{m(n)} - i_{m2(n)})$	di_{max}
	1	2	3	4	5	6	7
1	1,2	0,26	0.025, 1.0	231	217	14	0
2	2,5	0,55	0.055, 1.0	225	212	13	6
3	5	1,1	0.110, 1.0	215	203	12	16
4	10	2,2	0.220, 1.0	194	184	10	37
5	15	3,3	0.330, 1.0	172	164	8	59
6	20	4,4	0.442, 1.0	150	143	7	81
7	25	5,5	0.552, 1.0	126	122	4	105
8	30	6,6	0.663, 1.0	102	100	2	129
9	35	7,7	0.775, 1.0	78	77	1	153
10	40	8,8	0.886, 1.0	56	56	0	175

Як видно з рис. 5, значення як першого i_m так і наступного i_{m2} комутаційних сплесків струму зменшуються прямо пропорційне зростанню величини I_0/I_n (%), при чому якщо значення I_0/I_n досягає 35 ... 40 %, то прямі, відповідні i_m і i_{m2} , фактично зливаються. Окрім того, якщо взяти різницю di_{max} між максимальним значенням сплеску $i_{m(1)}$ (231A) і кожним наступним $(n+1)$ після відповідного приросту I_0 (див. колонки 5 і 7, табл. 1), то при $I_0/I_n = 40\%$ $di_{max} = i_{m(1)} - i_{m(10)} = 175A$.

Таким чином відношення значення цього спаду комутаційного сплеску струму (175A) до максимального значення такого ж роду сплеску (231A), але властивого мінімальному значенні I_0 має суттєву величину і в процентах становить:

$$di_{max}/i_{m(1)}(\%) = 100 \cdot 175 / 231 = 76\%.$$

Характер поведінки різниці di_{max} між максимальним значенням сплеску $i_{m(1)}$ (231A) і кожним наступним подібним значенням, проте після відповідного чергового приросту I_0 , показано на рис. 5 пунктирною лінією.

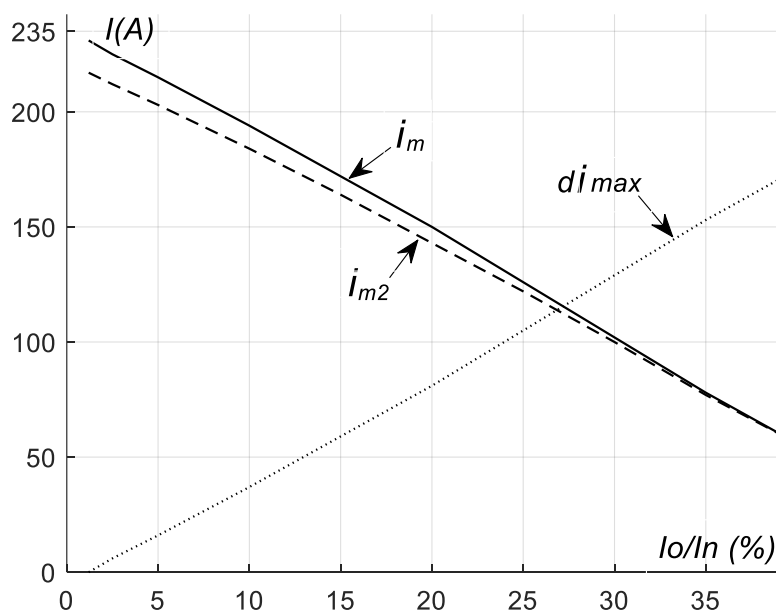


Рис. 5. Залежності величини сплесків струму первинної обмотки від відносного значення струму його холостого ходу

Наведені табличні і графічні результати впливу величини струму холостого ходу на процеси комутації однофазних трансформаторів можна поширити й на трифазні трансформатори. Але в таких випадках, необхідно враховувати вплив розгалуженості магнітного потоку осердя таких трансформаторів.

Висновок. Таким чином, збільшення величини струму холостого ходу трансформатора, яке часто спрямоване на стабілізацію горіння дуги змінного струму, спричиняє ще один позитивний ефект, це суттєве пропорціональне зменшення сплесків струму намагнічування в його первинній обмотці. В першу чергу це необхідно враховувати при повторно-короткочасному режимі комутації трансформатора та належному виборі комутуючих компонентів такої електротехнічної системи.

Список використаних джерел

1. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва ; за ред. проф. В. І. Міліх. – Київ : Каравела, 2022. – 452 с.
2. Заруба И. И. Усовершенствование трансформаторов для ручной дуговой сварки / И. И. Заруба, В. В. Андреев, В. В. Дыменко // Автоматическая сварка. – 2001. – № 3. – С. 45-48.
3. Андреев В. В. Имитационное моделирование электрических схем как этап разработки специализированных источников питания с управляемой формой переменного тока [Электронный ресурс] / В. В. Андреев, Е. М. Ефременко, Г. Н. Москович // Автоматическая сварка. – 2011. – № 2. – С. 9-12. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2011_2_3.
4. Коротинський, О. Є. Високоєфективні джерела для дугового зварювання на основі ємнісних накопичувачів електричної енергії / О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк, І. В. Вертецька // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 3. – С. 47-53. DOI: <http://doi.org/10.37434/as2021.03.08>.
5. Бурлака, В. В. Стабілізатор дуги змінного струму для зварювальних трансформаторів / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенна // Автоматическая сварка. – 2018. – № 3. – С. 48-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.09>.
6. Сегеда, М. С. Математичне моделювання розподілу напруги вздовж обвитки трансформатора під час імпульсних перенапруг / М. С. Сегеда, Є. В. Черемних, І. В. Хімюк, Т. А. Мазур, О. М. Курулишин // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 8-11.
7. Bontidean Gabriel Silviu. Simulations and experimental tests on the distribution of over-voltage within transformer windings / Silviu Gabriel Bontidean, Mihai Bădic, Mihai Iordache, Neculai Galan // U.P.B. Sci. Bull., Series C. – 2015. – Vol. 77, Is. 3. – Pp. 181-200.

8. Pivnyak, G. G. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G.Pivnyak / G. G. Pivnyak, I. V. Zhezhelenko, Y. A. Papaika // Education and Science of Ukrainian, National Mining University. – 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. – Switzerland : Trans Tech Publications Ltd, 2016. – 382 p.

9. Asadi, F. Simulation of Power Electronics Circuits with MATLAB/Simulink : Design, Analyze, and Prototype Power Electronics / F. Asadi. – Istanbul : Maltepe University Istanbul, – 2022. – 541 p.

10. Липківський, К. О. Процеси та організація комутації трансформаторів / К. О. Липківський, В. А. Халіков // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 5. – С. 22-30.

11. Організація асинхронної комутації трансформатора з урахуванням інерційності електромагнітних процесів / В. В. Кирик, В. А. Халіков, А. М. Жерносково, О. Ф. Шатан // Технічні науки та технології. – 2022. – № 3(29). – С. 136-143. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-136-143](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-136-143).

References

1. Ostashevskiy, M.O., & Yurieva O.Iu., Milykh, V.I. (Ed.) (2022). *Elektrychni mashyny i transformatory [Electric machines and transformers]*. Karavela.

2. Zaruba, I.I., Andreev, V.V., & Dymenko, V.V. (2001). Uovershenstvovanye transformatorov dlia ruchnoi duhovoї svarky [Improvement of transformers for manual arc welding]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, 3, 45-48.

3. Andreev, V.V., Efremenko, E.M., & Moskovich, G.N. (2011). Imitatsionnoe modelirovanie elektricheskikh skhem kak etap razrabotki spetsializirovannykh istochnikov pitaniia s upravliaemoi formoi peremennoho toka [Simulation of electrical circuits as a stage in the development of specialized power sources with a controlled form of alternating current]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, 2, 9-12. http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2011_2_3.

4. Korotynskiy, O.Ye., Skopiuk, M.I., & Vertetska, I.V. (2021). Vysokoeffektivni dzherela dlia duhovoho zvariuvannya na osnovi yemnisnykh nakopychuvachiv elektrychnoi enerhii [Highly efficient sources for arc welding based on capacitive storage of electrical energy]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, (3), 47-53. <http://doi.org/10.37434/as2021.03.08>.

5. Burlaka, V. V., Hulakov, S. V., & Podnebenna, S. K. (2018). Stabilizator duhy zminnoho strumu dlia zvariuvalnykh transformatoriv [AC arc stabilizer for welding transformers]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, 3, 48-51. <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.09>.

6. Sehed, M. S., Cheremnykh, Ye. V., Khimiuk, I. V., Mazur, T. A. Kurulyshyn, O. M. (2015). Matematychno modeliuвання rozpodilu napruhy vzdovzh obvytky transformatora pid chas impulsnykh perenapruh [Mathematical modeling of the voltage distribution along the winding of the transformer during impulse overvoltages]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 6, 8-11.

7. Bontidean, S. G., Bădic, M., Iordache, M., & Galan, N. (2015). Simulations and experimental tests on the distribution of over-voltage within transformer windings. *U.P.B. Sci. Bull., Series C*, 3, 77, 181-200.

8. Pivnyak, G.G., Zhezhelenko, I.V., & Papaika, Y.A. (2016). Transients in Electric Power Supply Systems. (5-th ed., revised and expanded). Translation from Ukrainian. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.

9. Farzin, A. (2022). *Simulation of Power Electronics Circuits with MATLAB/Simulink. Design, Analyze, and Prototype Power Electronics*. Istanbul, Turkey: Maltepe University Istanbul.

10. Lypkivskiy, K.O., & Khalikov, V.A. (2010). Protsesy ta orhanizatsiia komutatsii transformatoriv [Processes and organization of switching transformers]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 5, 22-30.

11. Kyryk, V.V., Khalikov, V.A., Zhernosiekov, A.M., & Shatan, O. F. (2022). Orhanizatsiia asynkronnoi komutatsii transformatora z urakhuvanniam inertsiinosti elektromahnitnykh protsesiv [Organization of asynchronous switching of the transformer taking into account the inertia of electromagnetic processes]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 3(29), 136-143. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-136-143](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-136-143).

Отримано 16.02.2024

Valery Kyryk¹, Volodymyr Khalikov², Anatoly Zhernosekov³, Oleksandr Shatan⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of Electrical Networks and Systems Department
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky KPI» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vkryrk@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

²Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Senior Lecturer of Electrical Networks and Systems Department,
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky KPI» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: xvavlad@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>. **Scopus Author ID:** 55327787500

³Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

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

⁴Scientific Researcher

Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shatanaf57@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

SWITCHING CURRENT OF THE PRIMARY WINDING OF THE TRANSFORMER WITH VARIATIONS IN ITS NO-LOAD CURRENT

Transformers are an indispensable component of various types of electrical circuits. Various restrictions are imposed on the transformer switching operation, which are caused by the functional purpose of the systems, their configuration, parameters and characteristics of existing or available switching components or devices and associated transient processes. When the power transformer is switched on asynchronously, current surges in its primary winding, including in modes close to the minimum load, may exceed its nominal current by several times. Such processes are undesirable from the point of view of energy efficiency, electromagnetic compatibility, transformer reliability and the functioning of protection systems. Proper analysis of electromagnetic processes was performed by numerical calculation methods followed by computer modeling using the MATLAB/Simulink software package. The purpose of the study is to highlight the extreme nature of switching current surges of the primary transformer and their dependence on the relative value of the no-load current of the winding. This current, in turn, depends on the slope of the main functional segment of the magnetization curve of the transformer core corresponding to its stationary mode of operation. The research shows that the increase in the idle speed of the transformer causes a directly proportional decrease in the switching current surges of the primary winding of the transformer. At the same time, the difference between the amplitude values of adjacent semi-periodic current surges decreases. It is noted that an increase in the value of the transformer's no-load current is often aimed at stabilizing the burning of the alternating current arc in electric welding installations. They are characterized by a repeated short-term mode of switching, and therefore the determination of the magnitude of switching current surges is relevant here.

Key words: transformer; magnetic flux; magnetic field saturation; idle; switch, commutation; transient process; modeling.

Fig.: 5. **Table:** 1. **References:** 11.

Василь Шинкаренко

доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: svf1102@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5054-823X>
Researcher ID: [AAK-3777-2020](https://orcid.org/AAK-3777-2020), SCOPUS Author ID: [7005550726](https://orcid.org/7005550726)

**КОНЦЕПЦІЯ ГЕНЕТИЧНОГО ЯДРА В СТРУКТУРНІЙ ОРГАНІЗАЦІЇ
І ЕВОЛЮЦІЇ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

Аналізується міждисциплінарний аспект в дослідженні концепції ядра в складних генетично організованих системах природного і антропогенного походження. На основі положень теорії генетичної еволюції електромеханічних систем розкрито інформаційну сутність генетичного ядра як носія генетичної інформації первинного джерела електромагнітного поля. Здійснено аналіз взаємозв'язків генетичного ядра з структурою груп, підгруп і малих періодів, породжувальної системи. Запропоновано визначення поняття генетичного ядра й узагальнено його властивості. Показано взаємозв'язок генетичного й енергетичного ядер в ієрархії рівнів складності електромеханічних систем. Розкрито принципи генетичного структуроутворення електромеханічних систем багатоядерного типу. Наголошено на важливість отриманих результатів досліджень для поширення технології генетичного передбачення і міждисциплінарного синтезу на складні технічні комплекси з ядрами різної фізичної природи.

Ключові слова: електромеханічні системи; складність; породжувальна система; генетичне ядро; генетична інформація; електромагнітна хромосома; генетичний код; інваріантність; ієрархія; багатоядерність; синтез; еволюція.

Табл.: 2. Рис.: 5. Бібл.: 41.

Актуальність. Електромеханічна взаємодія належить до фундаментальних фізичних явищ, які визначають процеси перетворення енергії як у природних системах (космічна електромеханіка, геоелектромеханіка, біоелектромеханіка), так і в системах природно-антропогенного походження (електричні машини, електромеханічні пристрої, магнітогідродинамічні перетворювачі енергії та ін.). Предмет дослідження технічної електромеханіки тривалий час обмежувався лише задачами внутрішньооб'єктного рівня, які зумовлені необхідністю параметричної оптимізації і адаптації режимів функціонування об'єкта до виконання заданої функції. Новітні результати структурно-системних і еволюційних досліджень в сучасній фізиці, і в електромеханіці зокрема, дозволяють розглядати й аналізувати електромеханічні системи (ЕМ-системи) як складні динамічні системи природно-антропогенного типу, що еволюціонують за принципами спадковості [1-6]. Такі системи характеризуються наявністю власного елементно-інформаційного базису, упорядкованого генетичною класифікацією природного типу, ієрархічністю рівнів структурної і таксономічної організації, просторово розподіленою структурою зі складною топологією зовнішніх фізичних і інформаційних зв'язків. Керована людиною технічна еволюція сучасних ЕМ-систем супроводжується процесами адаптивного структуроутворення, стійкою тенденцією структурно-функціональної інтеграції із системами іншої фізичної природи, розширенням видової різноманітності об'єктів і зміною їх поколінь. Системи з такими властивостями узагальнюються поняттям генетично організованих систем (ГОС).

Зазначені тенденції диктують принципово нові вимоги до пізнання, дослідження і міждисциплінарного проектування складних ЕМ-систем. Методологічну основу таких досліджень має визначати системна методологія, аксіоматичний базис якої є інваріантним до рівня складності, часу еволюції і функціональної приналежності компонентів складної системи. Зазначеним вимогам задовольняють положення теорії системно-генетичної еволюції електромеханічних систем, яка претендує на роль трансдисциплінарної галузі знань [5-7]. У структурній організації і еволюції ГОС фундаментального значення набувають властивості цілісних структур, які виконують функцію породжувальних по відношенню наявної і потенційно можливої структурної різноманітності систем – нащадків вищого рівня складності. Структура і функціонування довільної ГОС безпосередньо пов'язані з фізичною природою і властивостями генетичного ядра, яке виконує системо-

твірну роль в її еволюції. Концепція ядра визначає і забезпечує основну функцію складної системи, яка є визначальною для організації інших компонентів у цілісну систему. Тому дослідження концепції ядра в електромеханіці є актуальною і нагальною проблемою, розв'язання якої зумовлена зростанням складності електромеханічних систем і необхідністю розробки системної методології їх міждисциплінарного аналізу і синтезу.

Постановка проблеми. Поняття ядра складної системи сьогодні належить до найбільш загальних і універсальних дефініцій, які широко використовуються в наукових дослідженнях складних систем, явищ і процесів. У системно-генетичній концепції, поняття генетичного ядра є невід'ємною складовою ГОС як природного, так і штучного походження, незалежно від їхньої фізичної природи, масштабів і рівня складності. Тому основним завданням цього дослідження є обґрунтування концепції ядра і визначення його безпосереднього зв'язку з породжувальною системою, генетичною інформацією, генетичним кодом та генетичними програмами структуроутворення, які визначають структурно-функціональну цілісність і стійкість ЕМ-систем у процесі їх адаптивної еволюції.

Аналіз досліджень і публікацій. Вперше науковий світ дізнався про ядро у 1674 році, коли голландський натураліст Антоні ван Левенгук описав мікроскопічну будову живих клітин. Термін «ядро» запропонував у 1831 році шотландський ботанік Роберт Браун, який вивчав під мікроскопом клітини рослин [8]. У 1897 р. відомий німецький геофізик Еміль Віхерт ввів у наукову термінологію поняття ядра Землі [9]. А у 1911 р. Ернст Резерфорд у своїй доповіді «Розсіяння α - та β -променів та будова атома» вперше пояснив будову ядра атома [10]. У 1948 році вперше вдалося сфотографувати в теплових променях ядро нашої Галактики [11].

Поняття ядра в сучасній науці фактично вийшло на трансдисциплінарний рівень і широко використовується в різних галузях знань. Напрями сучасних досліджень засвідчують широку міждисциплінарну географію, різноманітність форм і властивостей ядерних систем і підходів до їх аналізу (табл. 1). Ядра можуть мати різну природу: фізичну, біологічну, інформаційну, ментальну, соціальну, інтелектуальну. Переважна частина публікацій присвячена аналізу будови і функціонування фізичних ядер в системах космічного, планетарного, хімічного, геологічного та біологічного походження, які становлять самостійні напрями міждисциплінарних досліджень.

Аналіз досліджень за проблематикою ядерної організації антропогенних систем характеризується широким метафоричним і синонімічним діапазоном (табл. 1). Ядро - це серцевина, основа, фундамент, центр концентрації сутності [12]. Сутність таких ядерних систем залишається незмінною, а форма може бути різною. Філософський аспект трактує ядро складної системи як інтегровану сутність, зміст якої визначається фундаментальними принципами й законами природи [13]. Ядро виконує ключову системотвірну роль, яка визначає структурну організацію системи, її інваріантні властивості стосовно часу еволюції і змінних зовнішніх впливів. Ядро - головний, найважливіший, сутнісний елемент, тому має функцію узагальнення, інтегрування та управління у відносинах між елементами і складовими системи [14].

В технічних системах поняття ядра, визначається на інтуїтивному, або метафоричному рівнях і, зазвичай, асоціюється з активною зоною (атомного реактора, турбогенератора, теплового двигуна), активним середовищем (лазера), робочою зоною реалізації технологічного процесу (верстату, металообробного центру), де безпосередньо здійснюється процес перетворення енергії одного виду в інший. З розвитком систем обчислювальної техніки і програмування наукова лексика доповнилася поняттями ядра мікропроцесора і ядра операційної системи.

Аналіз (табл. 1) показує різноманітність ядерних структур (фізичних, інформаційних, абстрактних, віртуальних), їх масштабів і підходів до визначення і дослідження за-

лежно від природи самої системи. Спільною властивістю ядерної будови систем природного і природно-антропогенного походження є наявність джерела енергії, яке забезпечує функціонування системи в межах її життєвого циклу. Функцію енергетичного ядра можуть виконувати перетворювачі енергії різної фізичної природи, властивості яких визначаються відповідними фізичними законами.

Таблиця 1 – Результати аналізу дефініцій і концепцій ядра в природних та антропогенних системах

Природа системи	Вид ядра	Визначення ядра	Графічний образ
1	2	3	4
Системи природного походження			
Біологічна	Ядро клітини	«Ядро - інформаційний центр клітини, у якому зосереджена основна частина генетичної інформації у формі ДНК. У ядрі клітини біологічних організмів міститься основний генетичний матеріал, представлений хромосомним набором...» [8].	
Нервова система	Ядро головного мозку	«Ядро - одна з форм організації сірої речовини нервової системи. Являє собою групу компактно розташованих у ЦНС «острівців» нейронів, які лежать у товщі білої речовини...» [8].	
Хімічна	Ядро атома	«Центральна частина атома, в якій зосереджена основна частина маси атома (понад 99,9 %). Ядро має позитивний заряд, що дорівнює кількості протонів, що входять в його склад, і саме від величини заряду ядра залежить, який хімічний елемент представлений атомом...» [10].	
Планетарна	Ядро Землі	«Центральна частина Землі, обмежена сейсмічною поверхнею на глибині близько 2900 км (середній радіус дорівнює 3470 км). Поділяється на тверде внутрішнє ядро радіусом близько 1300 км і рідке зовнішнє ядро з товщиною близько 2200 км, між якими іноді виділяється 250 км перехідна зона рідини підвищеної густини...» [9].	
Сонячна	Сонячне ядро	«Центральна найгарячіша частина Сонця, яка має щільність 150 г / см ³ в центрі, і температуру 15 мільйонів кельвінів (15 мільйонів градусів Цельсія, 27 мільйонів градусів за Фаренгейтом). Ядро всередині 0,20 сонячного радіуса містить 34% маси Сонця, але лише 0,8% об'єму Сонця...» [15].	
Галактична	Ядро галактики	«Ядро - регіон галактики, що знаходиться в її центрі. Центр галактики - порівняно невелика ділянка, радіус якої становить близько 1000 парсек, а властивості різко відрізняються від властивостей інших її частин...» [11].	
Антропогенні системи			
Ядерний реактор	Активна зона	«Область, в якій розташовані тепловидільні збірки (ТВЗ) ядерного палива та відбувається контрольована ланцюгова реакція поділу ядер важких ізотопів урану або плутонію. В ході ланцюгової реакції виділяється енергія у вигляді нейтронного та γ -випромінювання, β -розпаду, кінетичної енергії осколків поділу» [16].	
Електромеханічна	Активна зона	«Активна зона – локальний простір, утворений активними частинами електромеханічного об'єкта, які забезпечують процес електромеханічного перетворення енергії» [17].	
Обчислювальна	Ядро мікропроцесора	«Ядро – це самостійний обчислювальний блок в архітектурі процесора, здатний виконувати лінійну послідовність завдань за певний час» [18].	
Операційна	Ядро операційної системи	«Ядро - центральна частина операційної системи, що забезпечує інтерфейс між прикладними процесами та обладнанням комп'ютера» [19].	

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
Лінгвістична	Ядро граматичної системи	«...Розрізняють ядро системи, куди входять основні мовні одиниці та правила, та її периферію - маловживані факти, що стоять на межі літературної мови (застарілі, жаргонні, діалектні та ін.); розрізняють також ядро та периферію граматичної системи» [20].	
Філософія	Ядро філософії	«Ядром філософії як системи є логіка, діалектика й методологія пізнання. Структура сучасної філософії є набагато ширшою за її ядро. Класичними розділами філософії вважаються онтологія, гносеологія, антропологія, соціальна філософія. В свою чергу, філософія виконує функцію ядра світогляду» [21].	
Еволюційна	Ядро системної генетики	«...Системна генетика є внутрішнім змістом еволюції систем, що визначає механізм її руху. У цьому сенсі системна генетика є «ядром» еволюціоніки. І в цій своїй якості системна генетика постає як "генетичне ядро" системології або "генетична системологія"..."» [5].	
Термінологічна	Ядро терміносистеми	«...Ядро досліджуваної терміносистеми складають електроенергетичні терміни (70 %). Терміни периферії належать не лише до галузі електроенергетики, а й до інших наукових дисциплін (30 %)..."» [22]	
Мистецтво	Композиційне ядро	«Композиційне ядро - основний елемент архітектурної композиції, що поєднує інші її елементи у загальне художнє ціле» [23].	
Економічна	Ядро економічної системи	«Відносини власності утворюють ядро системи економічних відносин, визначають економічну природу наявного господарського ладу і всього суспільства..."» [24].	
Соціальна	Ядро соціальної структури	Ядром соціальної структури є класи [25].	
Правова	Ядро правової системи	Конституція України – ядро національної правової системи [26].	
Політична	Ядро політичної системи	Політична система – це сукупність і механізм взаємодії державних і політичних інститутів, політичних відносин, а також політичних і правових норм. Держава є центром, ядром політичної системи суспільства [27].	

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З огляду на широке використання поняття ядра в наукових дослідженнях, його місце і роль у теорії складних технічних систем ще не знайшло свого однозначного пояснення і визначення. Аналіз публікацій за проблематикою ядерної структури технічних систем показує, що вони у своїй основі мають інтуїтивно-метафоричний характер і не мають якихось чітких визначень або обґрунтувань. У концепції системно-генетичного підходу першочергового значення набуває аналіз безпосереднього зв'язку концепції генетичного ядра зі структурою породжувальної системи, її інваріантним елементним базисом і таксономічними категоріями, які залишаються недослідженими. Невизначеними також залишаються механізми взаємозв'язків генетичного і енергетичного ядер ЕМ-систем. Потребують пояснення аспекти неоднозначного тлумачення концепції ядра в ієрархії складності й у структуроутворенні багатоядерних систем.

Мета роботи. Метою цього дослідження є наукове обґрунтування концепції генетичного ядра електромеханічної системи, конкретизація його структури, властивостей і системних взаємозв'язків з породжувальною системою, що відкриває можливість поширення технології генетичного передбачення і методології інноваційного синтезу на складні технічні системи з компонентами різної фізичної природи.

Виклад основного матеріалу. Основна проблема, яка потребує свого пояснення, полягає в тому, що концепція ядра довільної ГОС, інформаційно і структурно має бути пов'язана з поняттям її породжувальної системи. Слід зазначити, що проблема відкриття і дослідження породжувальних структур та систем в сучасній науці є більш фундаментальною і неоднозначною. Свого часу Д.І. Менделєєв та інші вчені неодноразово наголошували на тому, що періодичну систему не можна розглядати лише як природну систематику елементів, тому що вона є відображенням більш глибоких закономірностей, і перш за все, закономірностей генетичного характеру [6; 28; 29]. Тому періодичні системи первинних елементів є предметом досліджень загальної теорії систем, математики, фізики елементарних частинок, біології, лінгвістики і фундаментальної науки загалом.

Породжувальна періодична система – природна класифікація генетично визначених елементів фізичної або абстрактної природи, яка є формою подання принципів збереження і інтегрального періодичного закону [30]. Класичним прикладом генетичної класифікації природного типу є періодична система хімічних елементів. Ідея існування материнських структур у математиці належить Н. Бурбакі, які стверджують, що основу математики визначають три породжувальні структури – алгебраїчна, топологічна і структура порядку [31]. Регулярність у мінливості споріднених біологічних таксонів, на зразок періодичного закону, досліджували М. І. Вавілов і О. О. Любішев. Пошук періодичної системи в біології продовжується і в наші дні [32; 33].

Відкриттям у 1990 році періодичної структури генетичної класифікації (ГК) первинних джерел електромагнітного поля започатковано новий етап у вивченні ЕМ-систем і їх системного ядра – породжувальної системи генетичного типу. Структура й інваріантні властивості елементного базису ГК виконують роль наукової платформи для пізнання системних принципів генетичного структуроутворення і формування нових наукових напрямів фундаментальних досліджень електромагнітних, електромеханічних та механічних систем. ГК виконує функцію системного носія принципів збереження, генетичних кодів і інтегрального періодичного закону [6]. Її відкриття стало черговим підтвердженням принципу множинності періодичних систем і інтегрального періодичного закону. Наявність власного аксіоматичного і елементного базису, упорядкованого періодичною класифікацією природного типу є безперечною ознакою приналежності такої системи до категорії ГОС. Аналіз структури й інваріантних властивостей періодичної породжувальної системи електромагнітних елементів уперше узагальнено в монографії автора [6]. З використанням технології генетичного передбачення ізоморфізм породжувальних систем підтвердився відкриттям періодичної системи натуральних чисел і універсального принципу їх кодування [34].

Ієрархія рівнів складності технічних систем зумовлює багатоваріантність і неоднозначність визначення концепції ядра. Чим вищий рівень складності системи, тим більш узагальненим характеризується її ядро (табл. 2).

Аналіз табл. 2 показує, що функції ядра системи вищого рівня асоціативно ставиться у відповідність система попереднього рівня. Але в ієрархії рівнів складності визначальна роль належить ядерним структурам породжувального рівня, які визначають аксіоматику, інваріантні властивості й забезпечують інформаційну цілісність складної системи.

У теорії генетичного структуроутворення складних технічних систем з електромеханічними перетворювачами енергії, які суміщують підсистеми різної фізичної природи, статус породжувальної структури належить первинному джерелу електромагнітного поля, яке є ізоморфним поняттю електромагнітної хромосоми – носія електричних зарядів і генетичної інформації. Фундаментальність поняття електромагнітної хромосоми і її інваріантні властивості визначаються принципами збереження електромагнітної структури і генетичної інформації первинних джерел електромагнітного поля в періодичній структурі ГК. Концепція генетичного ядра довільного первинного джерела поля виконує

системотвірну функцію, яка забезпечує взаємозв'язок елементно-інформаційного базису породжувальної системи з таксономічними, структурними, інформаційними, функціональними і фізичними властивостями поколінь ЕМ-систем, що еволюціонують.

Таблиця 2 – Концепція ядра в організації складних електромеханічних систем (на прикладі ЕМ-систем типу «Мотор – шпindel»)

Рівень організації ГОС	Система	Ядро	Визначення (приклад)
Генетичний	Генетична класифікація (породжувальна система)	Первинні джерела електромагнітного поля	«...Генетичний підхід є основним не тільки при аналізі та перетворенні біологічних та соціальних систем. Цей підхід є правомірним та природним для різних класів антропогенних систем і, зокрема, для аналізу та синтезу технічних систем...» [35]
Хромосомний	Електромагнітна хромосома	Генетичний код	«...первинне джерело електромагнітного поля (електромагнітна хромосома) виступає елементарним носієм інваріантних складових генетичної інформації (генетичного коду)» [6]
Об'єктний	Електродвигун	Активна зона	«Обмотки – серце електричної машини...» [17]
Агрегатний	Мотор-шпindel	Електродвигун головного руху	«...Основною компонентою шпинделя є його двигун...» [36]
Системний	Верстат, металообробний центр	Мотор-шпindel	«Електричний шпindel – серце верстата. Його робота забезпечує «життєдіяльність» усіх механізмів...» [37]
Галузевий	Машинобудування	Верстатобудування	«...Верстатобудування – серцевина машинобудування...» [37]
Метасистемний	Промисловість	Машинобудування	«Машинобудування є базовою галуззю економіки, а також технологічним ядром промисловості. ...» [38]

У предметній області періодичної структури ГК, інформаційна структура довільного генетичного ядра визначається інваріантними складовими генетичної інформації: просторовою геометрією G , електромагнітною симетрією S і топологією T .

$$C_G = \langle G, S, T \rangle \tag{1}$$

Інваріантні властивості генетичних ядер породжувального рівня визначаються принципами збереження: електромагнітної симетрії S (в межах довільних груп ГК); топологічної інваріантності T (в межах довільних підгруп); просторової геометрії і принципом електромагнітної дисиметризації П. Кюрі G (в межах довільних малих періодів) (рис. 1).

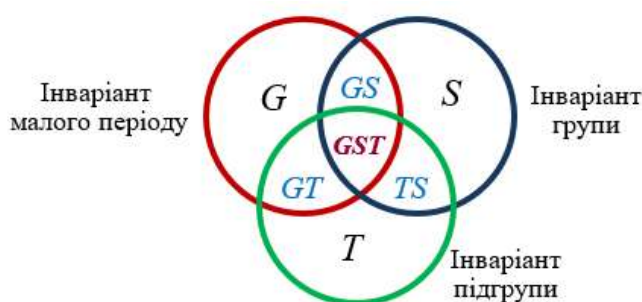


Рис. 1. Інваріантні зв'язки генетичного ядра довільного первинного джерела електромагнітного поля (електромагнітної хромосоми) зі структурою груп, підгруп і малих періодів

Діаграма Венна (рис. 1) відтворює взаємозв'язок складових генетичної інформації і їх комбінаторику, з принципами збереження і структурою породжувальної системи. Комбінаторика складових генетичної інформації генетичного ядра визначає аксіоматику і системні властивості породжувальних ЕМ-структур та їх нащадків у межах відповідних груп, підгруп і малих періодів ГК: інваріанти GS – задовольняють принципу збереження

електромагнітної симетрії і принципу топологічної інваріантності породжувальних структур у межах довільної групи; комбінації інваріантів GT ставиться у відповідність ієрархія рівнів складності просторової (родової) геометрії і принцип парності в межах довільного малого періоду; інваріанти TS – визначають взаємозв'язок гомеоморфізму (топологічної еквівалентності) елементного базису з їх електромагнітною орієнтованістю в межах довільної підгрупи ГК.

Центральна область діаграми Венна інтегрує всі три складові (G, S, T), які визначають координати первинного джерела електромагнітного поля в періодичній структурі ГК і узагальнюються поняттям універсального генетичного коду. Тому інформаційна структура $\langle G, S, T \rangle$, яка також є інваріантом, корелюється з принципом збереження генетичного ядра електромагнітної хромосоми. Отже, довільне первинне джерело електромагнітного поля в структурі ГК виконує роль елементарного генетичного ядра, інформація якого представлена універсальним генетичним кодом.

Інформаційній структурі генетичного ядра на об'єктному рівні, ставиться у відповідність активна зона ЕМ-об'єкта – просторова геометрія і топологія активної поверхні, орієнтованість і електромагнітна симетрія полюсотвірної системи, через які також визначаються просторова орієнтація магнітного поля, наявність поздовжніх і поперечних кінцевих електромагнітних ефектів та інші системні властивості структур – нащадків (рис. 2). Генетичний код фактично є квінтесенцією періодичного закону і виступає носієм інваріантної генетичної інформації первинного джерела електромагнітного поля, яка залишається незмінною в ряду поколінь – нащадків.



Рис. 2. Системність взаємозв'язків генетичного ядра електромеханічної системи зі структурою груп, підгруп і періодів ГК, інваріантними складовими генетичної інформації, таксономічними категоріями і активною зоною довільного ЕМ-об'єкта

Для ГОС природного і природно-антропогенного походження концепція генетичного ядра об'єктного рівня безпосередньо пов'язана з його енергетичним ядром. Для ЕМ-систем структурно-інформаційним еквівалентом генетичного і енергетичного ядра на об'єктному рівні виступає активна зона. Активна зона перетворювача – локальний простір, утворений його активними частинами, які безпосередньо забезпечують процес електромеханічного перетворення енергії. Саме через структуру активної зони ЕМ-об'єкта здійснюється ідентифікація складових генетичної інформації універсального генетичного коду відповідного первинного джерела електромагнітного поля в періодичній структурі ГК. Наявність зазначених закономірностей забезпечує стійкі інформаційні взаємозв'язки між ядром системи і зростаючою різноманітністю ЕМ-об'єктів у процесі еволюції їх поколінь.

Ієрархія структурної організації ГОС зумовлює ієрархічність поняття генетичного ядра. У структурній організації ЕМ-систем концепція ядра ідентифікується (за необхідністю) на довільному рівні їх складності і визначається інваріантною генетичною інфо-

рмациєю ядра породжувальної електромагнітної хромосоми. Інформація ядер вищих рівнів визначається відповідним рівнем складності її структури і параметрів і доповнюється варіативною частиною як генетичної, так і набутої інформації в процесі її адаптивної еволюції (рис. 3).



Рис. 3. Онтологія генетичного ядра в структурній організації і еволюції електромеханічних систем

Цілком очевидно, що в ієрархії рівнів організації складних ЕМ-систем, ключова роль ядра хромосомного рівня є визначальною, тому що електромагнітні хромосоми є первинними носіями генетичних кодів, які потім ідентифікуються і зберігаються на всіх вищих рівнях складності. Це підтверджується також і тим, що з його ліквідацією система неспроможна виконувати свою основну функцію, у той час як втрата інших допоміжних елементів, або підсистем лише обмежує її область функціонування. Ядро еволюції відповідного роду, гомологічного ряду або функціонального класу ЕМ-систем визначається через інформацію відповідного домінуючого виду, носієм генетичної інформації якого виступає його перший структурний представник (архетип виду) (рис. 4).

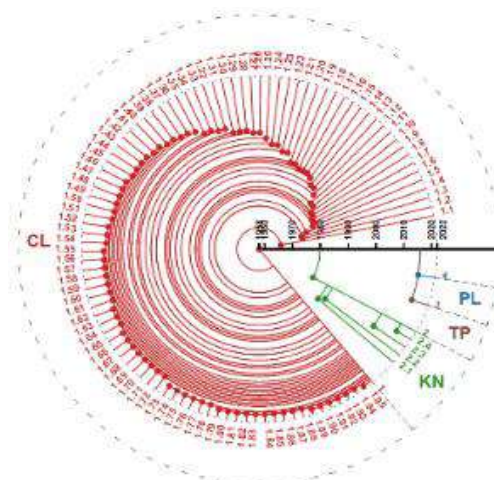


Рис. 4. Родове ядро електродвигунів головного руху (домінуючий вид CL 0.2y) в еволюції мотор – шпинделів металообробних верстатів ($T_E = 64$ роки; $N_S = 100$)

Генетичне ядро концентрує інваріантну складову генетичної інформації, яка визначає здатність системи до адаптації та розвитку в мінливих умовах фенотипу. Ядро є невід'ємною складовою феномену «генетичної пам'яті» довільного ЕМ-об'єкта [41]. В ядрі міститься вся історія системи від її народження до деструкції.

Концепція генетичного ядра безпосередньо пов'язана з поняттям багатоядерних систем. Багатоядерна організація властива як системам природного походження (багатоядерні клітинні організми, багатоядерні структури хімічних сполук, багатоядерні структури кристалів та ін.), так і штучним (ядра математики, багатоядерні процесори і мікроконтролери в електротехніці, ансамблі в архітектурі, хронемі в лінгвістиці, та ін.). Багатоядерність – одна з фундаментальних властивостей ГОС, яка забезпечує її структурну різноманітність і визначається матричною організацією елементного базису та його здатністю до ускладнення з утворенням гібридних та ізомерних просторових композицій.

Періодична структура ГК виступає системним носієм універсальних генетичних кодів, які можна трактувати як спосіб упорядкованого подання інформації первинних електромагнітних ядер породжувального типу. Багатоядерні структури внутрішньовидового і об'єктного рівнів є результатом генетичного синтезу з домінуванням операторів реплікації, схрещування і просторової ізомерії. Прикладом багатоядерних структур об'єктного рівня виступають відповідні репліковані структури об'єктів – просторово розподілені багатоіндукторні системи, багатомашинні агрегати та ін., а також класи гібридних ЕМ-об'єктів, активна зона яких суміщує структури з різними генетичними кодами. Відкриття закону гібридизації електромеханічних об'єктів, дозволило вперше пояснити принципи гібридизації (з моно-, ди- і полігібридним схрещуванням) структур і визначити кількість генетично допустимих класів і видів гібридних ЕМ-систем [39].

Технічна еволюція реалізується шляхом зростання генетичної складності систем і поступового переходу до використання систем багатоядерного типу (гібридні енергетичні комплекси, гібридні системи електротранспорту, гібридні металообробні центри, тощо). На рівні довільних функціональних класів ЕМ-систем структура генетично допустимої множини породжувальних ядер, які задовольняють вимогам інтегральної функції синтезу, однозначно визначається відповідними макрогенетичними програмами. Сучасні складні електромеханічні агрегати і технічні комплекси, апріорі є представниками відповідних гібридних класів, які характеризуються багатоядерною генетичною структурою. Як приклад, на рис. 5 представлено модель синтезу багатофункціональних мотор-шпиндельних агрегатів з дво-, три- та чотирикоординатним просторовим рухом [40].

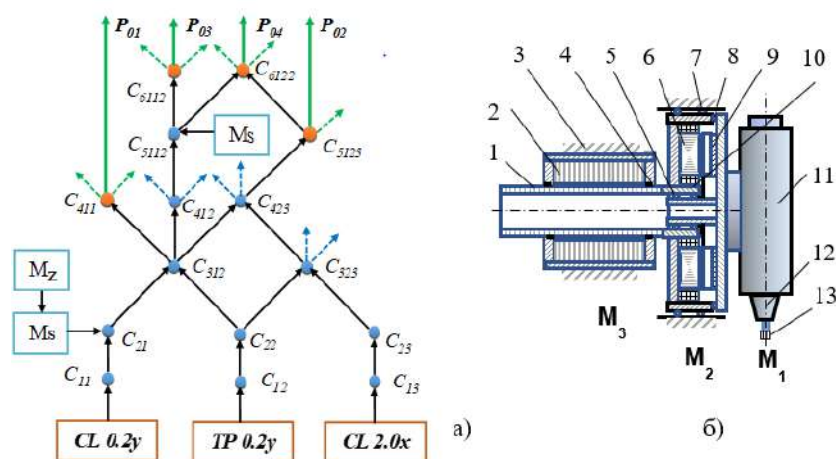


Рис. 5. Основні процедури генетичного синтезу мотор-шпиндельних агрегатів з гібридним ядром електромеханічної системи:
а – узагальнена генетична модель синтезу; б – синтезований варіант трикоординатного агрегату з просторово адаптивною модульною структурою

У генетичній моделі (рис. 5, а) синтезовані структури гібридних ЕМ-систем ідентифікуються за генетичними формулами породжувальних гібридних хромосом четвертого, п'ятого та шостого покоління. Для візуалізованого варіанту мотор – шпиндельного агрегату (рис. 5, б), функцію породжувального виконує гібридне ядро хромосоми C_{5123} :

$$C_{5123} = [(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2 \times M_S \times M_Z] \times [(TP0.2y)_1:(TP0.2y)_2 \times (CL2.0x)_2 : M_{OX}] \subset H_{GTE} \quad (2)$$

Синтезована структура агрегату є представником триядерної структури, яка інтегрує властивості породжувальних хромосом трьох видів: $CL\ 0.2y$ (модуль головного руху OZ), $CL\ 2.0x$ (модуль подачі OX) і $TP\ 0.2y$ (поворотний модуль OX). За генетичним статусом, синтезована багатоядерна ЕМ-структура є представником міжродових полігібридів класу H_{GTE} , а структура мотор-шпиндельного агрегату є представником класу міжсистемних гібридів.

Слід розрізняти поняття багатоядерних систем однієї фізичної природи (наприклад, з електромеханічними перетворювачами енергії) і багатоядерних систем зі структурою різної фізичної природи (наприклад, з електромеханічними, тепловими, квантомеханічними та іншими перетворювачами енергії). Якщо процедури синтезу складних систем першого типу підлягають повній алгоритмізації, то синтез багатоядерних структур другого рівня, у зв'язку з відсутністю генетичної інформації ядерних структур іншої фізичної природи, здійснюється шляхом заміни їх генетичної інформації на придбану. Технологія генетичного передбачення і міждисциплінарного синтезу багатоядерних ЕМ-систем є одним з перспективних напрямів міждисциплінарного синтезу складних систем з генетичними й енергетичними ядрами різної фізичної природи.

Результати системно-генетичного аналізу концепції генетичного ядра ЕМ-систем дозволяють узагальнити його основні властивості. Довільне генетичне ядро:

- виступає невід'ємним структурно-інформаційним елементом породжувальної системи первинних джерел електромагнітного поля;
- виконує роль елементарного носія універсального генетичного коду, який визначає місцеположення генетичного ядра в періодичній структурі ГК, його інваріантні властивості і спадкову інформацію структур-нащадків;
- виконує функцію системотвірного фактора для об'єднання інших компонентів у цілісну систему;
- виконує функцію породжувальної структури відповідного Виду ЕМ-об'єктів;
- наділено властивістю гомеоморфізму є носієм генетичної інформації стосовно джерел – ізотопів, Видів – близнюків і двійників та гібридних Видів;
- виступає носієм взаємопов'язаних таксономічних ознак своєї приналежності до відповідного Виду, Роду і горизонтального гомологічного ряду;
- є невід'ємною складовою феномену «генетичної пам'яті», фізичним носієм якої виступають ЕМ-об'єкти відповідного Виду;
- визначає генетичну інформацію структур вищих рівнів складності в ієрархії рівнів організації електромеханічних систем;
- виконує функцію хромосоми-реплікатора в процедурах синтезу багатоядерних структур.

Зазначені властивості є взаємопов'язаними, що відповідає принципу системності концепції генетичного ядра, властиву представникам ГОС. Системним носієм упорядкованої інформації, стосовно генетично допустимих ядер, виступає їх породжувальна система – періодична структура генетичної класифікації первинних джерел електромагнітного поля. Функцію фізичних носіїв генетичного ядра виконують електромеханічні об'єкти довільного рівня складності.

Узагальнені результати системно-генетичного аналізу дозволяють дати наступне визначення: генетичним ядром називається довільний структурно-інформаційний елемент періодичної породжувальної системи, який є її невід'ємною складовою і носієм універсального генетичного коду.

У теорії генетичного структуроутворення, наявність інформації про генетичне ядро (в першу чергу, неявних видів) є необхідною і достатньою умовою для постановки задач типу «відкриття систем». Це новий клас задач, постановка і розв'язання яких ґрунтується на використанні методології системно-генетичного аналізу, технології генетичного передбачення та інноваційного синтезу з цілеспрямованим введенням в еволюцію нових технічних об'єктів, які виконують роль тригера для «запуску» еволюційних процесів на рівні відповідних видів, горизонтальних гомологічних рядів та функціональних класів, ще не задіяних в технічній еволюції.

Висновки. Еволюція техніки – це процес технічної реалізації, удосконалення і конкурентної боротьби ядерних структур певної фізичної і генетичної природи. На відміну від природних систем, процеси адаптивної еволюції систем антропогенного походження визначається і реалізується людиною - творцем. Всі еволюційні події створені людиною в межах відповідної ГОС розпізнаються і відтворюються через інваріантний елементний базис їх породжувальної системи – системного носія первинних ядер. Концепція ядра належить до категорії понять трансдисциплінарного рівня і становить невід'ємну складову генетично організованої системи. Концепція генетичного ядра це підказане природою нове бачення проблеми складності, яке має важливе значення в методології міждисциплінарного передбачення, синтезу й аналізу складних технічних систем із багатоядерною структурою перетворювачів енергії різної фізичної природи.

Список використаних джерел

1. Jörg, T. Generative Complexity in a Complex Generative World. A Generative Revolution in the Making. Published / T. Jörg. – Springer, 2022. – 140 p.
2. Эбелинг, В. Физика процессов эволюции. Синергетический подход / В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель. – Москва : Эдиториал УРСС, 2001. – 328 с.
3. Князева, Е. Н. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов. – Москва : Наука, 1994. – 236 с.
4. Балашов, Е. П. Эволюционный синтез систем / Е. П. Балашов. – Москва : Радио и связь, 1985. – 328 с.
5. Субетто, А. И. Системогенетическая парадигма организации академического знания и системного проектирования / А. И. Субетто // Междисциплинарные проблемы системологии. – В. Новгород : НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2004. – С. 15-19.
6. Шинкаренко, В. Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем / В. Ф. Шинкаренко. – Київ : Наукова думка, 2002. – 288 с.
7. Шинкаренко В. Ф. Організація і методологія трансдисциплінарних досліджень в науці і технічній освіті / В. Ф. Шинкаренко // Сучасна освіта – доступність, якість, визнання : зб. наук. праць XIV Міжнар. наук.-метод. конф. (м. Краматорськ, 09-11 листоп. 2022 р.). – Тернопіль, 1922. – С. 208-213.
8. Околітенко, Н. І. Основи системної біології : навч. посіб. / Н. І. Околітенко, Д. М. Гродзинський. – Київ : Либідь, 2005. – 360 с.
9. Rick Wakeman. Planetary science: Mission to Earth's core – a modest proposal. – Nature, 2003. – Pp. 239-240. doi:10.1038/423239a
10. Каденко, І. М. Фізика атомного ядра та частинок : підручник / І. М. Каденко, В. А. Плюйко. – Київ, 2019. – 467 с.
11. Общая теория относительности: признание временем / А. Н. Александров, И. Б. Вавилова, В. И. Жданов, А. И. Жук и др. – Київ : Наукова думка, 2015. – 330 с.
12. Шарден, П. Т. Феномен человека / Пьер Теяр де Шарден. – Москва : Наука, 1987. – 240 с.
13. Whelton, V. J. The philosophical core of King's conceptual system / V. J. Whelton // Nurs Sci Q. – 1999. – № 12 (2). – P. 158-63. doi: 10.1177/08943189922106594. PMID: 11847683.
14. Лисеев, И. К. Системный подход в современной науке (к 100-летию Людвиг фон Бергаланфи) / И. К. Лисеев, В. Н. Садовский. – Москва : Прогресс - Традиция, 2004. – 561 с.
15. Lewis, R. The Illustrated Encyclopedia of the Universe / R. Lewis. – New York : Harmony Books, 1983. – 65 p.
16. Павлович, В. М. Фізика ядерних реакторів : навч. посіб. / В. М. Павлович ; НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС. – Чорнобиль (Київ. обл.) : Ін-т проблем безпеки АЕС, 2009. – 224 с.

17. Жерве, Г. К. Обмотки электрических машин / Г. К. Жерве. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1989. – 400 с.
18. Мікропроцесорні пристрої : навч. посіб. для студ. зі спец-ті «Електроніка» / Т. О. Терещенко, В. А. Тодоренко, Л. М. Батрак, Ю. С. Ямненко. – Київ : Кафедра, 2017. – 244 с.
19. Зайцев, В. Г. Операційні системи : навч. посіб. для студ. спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» / В. Г. Зайцев, І. П. Дробязко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 240 с.
20. Барчук, В. Граматична темпоральність. Інтервал. Час. Таксис / В. Барчук. – Івано-Франківськ, 2011. – 416 с.
21. Решетов, О. О. Філософія та її проблематика / О. О. Решетов, В. Т. Кирильчук, З. В. Стежко // Наукові записки. – 2010. – Вип. 10, Ч. 1. – С. 16-19.
22. Харчук, Л. В. Тематична класифікація українських електроенергетичних термінів / Л. В. Харчук // Термінологічний вісник : зб. наук. праць / відп. ред. В. Л. Іващенко. – Київ : Інститут української мови НАНУ, 2013. – Вип. 2 (2). – С. 72-77.
23. Михайленко, В. Є. Основи композиції (геометричні аспекти художнього формоутворення) : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів / В. Є. Михайленко, М. І. Яковлев. – Київ : Каравела, 2004. – 304 с.
24. Лук'яненко, Д. Г. Міжнародна економіка : підручник / Д. Г. Лук'яненко, А. М. Поручник, Я. М. Столярчук. – Київ : КНЕУ, 2014. – 762 с.
25. Соціологія : підруч. для соціогуманітар. спеціальностей вищ. навч. закладів / Е. Ю. Галушко, А. О. Ярошенко, В. П. Степико та ін. – Київ : Вид-во НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2010. – 360 с.
26. Кельман, М. С. Загальна теорія права : підручник / М. С. Кельман, О. Д. Тихомиров ; за заг. ред. М. І. Козюбри. – Київ : Ваїте, 2015. – 392 с.
27. Політична система сучасного суспільства : навч. посіб. / В. В. Мадіссон, Т. І. Кадлубович, Д. С. Черняк, Н. В. Пархоменко. – Київ : КНУТД, 2015. – 229 с.
28. Горох, А. В. Генетический аспект периодической системы химических элементов // Творческое наследие В.И. Вернадского и современность : доклады и сообщ. 4-й Междунар. науч. конф. (Донецк, 21-25 апр. 2005 г.). – Донецк : ДонНТУ, 2005. – 260 с.
29. Розова, С. С. Классификационная проблема в современной науке / С. С. Розова. – Новосибирск : Наука, 1986. – 224 с.
30. Словник із структурної і генетичної електромеханіки / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Шиманська. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 112 с.
31. Бурбаки, Н. Н. Очерки по истории математики / Н. Н. Бурбаки. – Москва : ИИЛ, 1963. – 292 с.
32. Инге-Вечтомов, С. Поиски периодической системы... в эволюции / С. Инге-Вечтомов // Наука из первых рук. – 2004. – № 2 (3). – С. 21-25.
33. Попов, И. Ю. Периодические системы и периодический закон в биологии / И. Ю. Попов. – Москва : КМК, 2008. – 224 с.
34. Шинкаренко, В. Ф. Изоморфизмы порождающих систем (на примере электромагнитной и числовой) / В. Ф. Шинкаренко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2019. – Вип. № 1. – С. 46-55.
35. Балашов, Е. П. Эволюционный синтез систем / Е. П. Балашов. – Москва : Радио и связь, 1985. – 328 с.
36. Морфологический синтез станков и их механизмов / Ю. Н. Кузнецов, Ж. А. Хамуйела, А. А. Гера, Т. О. Хамуйела ; под общей ред. Ю. Н. Кузнецова. – Київ : ООО «Гнозис», 2012. – 416 с.
37. Кузнецов, Ю. М. Майбутнє верстатобудування – серцевини машинобудування України в умовах INDUSTRY-4.0 / Ю. М. Кузнецов // Обладнання і технології сучасного машинобудування : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Тернопіль, 11-12 травня 2017 р.). – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя. – С. 15-18.
38. Барташевська Ю. М. Розвиток машинобудування України: стан, проблеми, перспективи / Ю. М. Барташевська // Європейський вектор економічного розвитку. – 2010. – № 1. – С. 19-25.
39. The Principle of Hybridization in the Structural Organization and Evolution of Electromechanics Objects / V. Shynkarenko, Y. Kuznetsov, L. Soos, A. Shymanska, V. Kotliarova, P. Krasovskiy // Journal of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 72, № 2. – С. 173-188.

40. Інноваційний синтез просторових схем гібридних електромеханічних систем для мотор-шпіндельних агрегатів з адаптивною просторовою структурою / В. Ф. Шинкаренко, Ю. м. Кузнецов, П. О. Красовський, А. Гутник // Електромеханічні системи, методи оптимізації та моделювання. – 2023. – № 2. – С. 8-18.

41. Розпізнавання генетичних програм функціонального класу складних електромеханічних систем за інформацією його довільного представника / В. Ф. Шинкаренко, Ю. В. Гайдаєнко, Л. М. Кобзенко, П. В. Отрішко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – № 1. – С. 57-65.

References

1. Jörg, T. (2022). *Generative Complexity in a Complex Generative World. A Generative Revolution in the Making*. Published: Springer.

2. Ebeling, V., Engel, A., Feistel, R. (2001). *Fizika protsessov evoliutsii. Sinerheticheskii podkhod [Physics of evolutionary processes. Synergetic approach]*. Editorial URSS.

3. Knyazeva, E.N., Kurdyumov, S.P. (1994). *Zakony evoliutsii i samoorhanizatsii slozhnykh sistem [Laws of evolution and self-organization of complex systems]*. Nauka.

4. Balashov, E.P. (1985). *Evolutsionnyi sintez sistem [Evolutionary synthesis of systems]*. Radio and Communications.

5. Subetto, A.I. (2004). Systemohenetycheskaia paradyhma orhanyzatsyy akademicheskoho znaniya y systemnoho proektyrovaniya [Systemogenetic paradigm for organizing academic knowledge and system design]. *Mezhdistsiplinarnye problemy sistemologii – Interdisciplinary problems of systemology*. (pp. 15–19.). Yaroslav-the-Wise Novgorod State University.

6. Shynkarenko, V.F. (2002). *Osnovy teorii evoliutsii elektromekhanichnykh sistem [Fundamentals of the theory of evolution of electromechanical systems]*. Naukova dumka.

7. Shynkarenko, V.F. (2022). Orhanizatsiia i metodolohiia transdystyplinarnykh doslidzhen v nauutsi i tekhnichnii osviti [Organization and methodology of transdisciplinary research in science and technical education]. *Suchasna osvita – dostupnist, yakist, vyznannia: XIV Mizhnar. nauk.-metod. konf. – Proceedings of the XIV International science and method conference "Modern education - accessibility, quality, recognition"* (pp. 208-213).

8. Okolitenko, N.I., Grodzynskiy, D.M. (2005). *Osnovy systemnoi biolohii [Fundamentals of systems biology]*. Lybid.

9. Wakeman, R. (2003). *Planetary science: Mission to Earth's core – a modest proposal* (pp. 239–240). doi:10.1038/423239a.

10. Kadenko, I.M., Plyuiko, V.A. (2019). *Fizyka atomnoho yadra ta chastynok [Physics of the atomic nucleus and particles]*.

11. Aleksandrov, A., Vavilova, I., et al. (2015). *Obshchaia teoriya odnosytelnosti: pryznanye vremenem [General theory of relativity: recognition by time]*. Naukova Dumka.

12. Teilhard de Chardin, P. (1987). *Fenomen cheloveka [The Phenomenon of Man]*. Nauka.

13. Whelton, B.J. (1999). The philosophical core of King's conceptual system. *Nurs Sci Q.*, 12(2), 158-63. doi: 10.1177/08943189922106594. PMID: 11847683.

14. Liseev, I.K., Sadovsky, V.N. (2004). *Sistemnyi podkhod v sovremennoi nauke (k 100-letiiu Liudviga fon Bertalanfi) [Systematic approach in modern science (to the 100th anniversary of Ludwig von Bertalanffy)]*. Progress - Tradition.

15. Lewis, R. (1983). *The Illustrated Encyclopedia of the Universe*. Harmony Books, New York.

16. Pavlovich, V.M. (2009). *Fizyka yadernykh reaktoriv [Physics of nuclear reactors]*. Institute of NPP Safety Problems.

17. Gervais, G.K. (1989). *Obmotki elektricheskikh mashin [Industrial testing of electrical machines]*. Energoatomizdat.

18. Tereshchenko, T. O., Todorenko, V. A., Batrak, L. M., Yamnenko, Yu. S. (2017). *Mikroprotsesorni prystroi [Microprocessor devices]*. Department.

19. Zaitsev, V.G., Drobyazko, I.P. (2019). *Operatsiini systemy [Operating Systems]*. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

20. Barchuk, V. (2011). *Hramatychna temporalnist. Interval. Chas. Taksys [Grammatical temporality. Interval. Time. Taxis]*.

21. Reshetov, O.O., Kyrylchuk, V.T., Stezhko, Z.V. (2010). *Filosofiiia ta yii problematyka [Philosophy and its problems]*. *Naukovi zapysky – Scientific notes*, 10(1), 16-19.

22. Kharchuk, L.V. (2013). Tematychna klasyfikatsiia ukrainskykh elektroenerhetychnykh terminiv [Thematic classification of Ukrainian electric power terms]. *Terminolohichnyi visnyk – Terminological Bulletin*, 2(2), 72–77.
23. Mykhaylenko, V.E., Yakovlev, M.I. (2004). *Osnovy kompozytsii (heometrychni aspekty khudozhnoho formoutvorennia) [Fundamentals of composition (geometric aspects of artistic formation)]*. Karavela.
24. Lukyanenko, D.G., Poruchnyk, A.M., Stolyarchuk, Y.M. (2014). *Mizhnarodna ekonomika [International economy]*. KNEU.
25. Galushko, E.Yu., Yaroshenko, A.O., Stepiko, V.P., et al. (2010). *Sotsiologhiia [Sociology]*. Publication of the NPU named after M.P. Dragomanova.
26. Kelman, M.S., Tikhomirov, O.D., Kozyubra, E. (Ed.) (2015). *Zahalna teoriia prava [General theory of law]*. Waite.
27. Madisson, V.V., Kadlubovych, T.I., Chernyak, D.S., Parkhomenko, N.V. (2015). *Politychna systema suchasnoho suspilstva [The political system of modern society]*. KNUTD.
28. Gorokh, A.V. (2005). Geneticheskii aspekt periodicheskoi sistemy khimicheskikh elementov [Genetic aspect of the periodic system of chemical elements]. *Tvorcheskoe nasledye V.Y. Vernadskoho y sovremennost – Creative heritage of V. I. Vernadsky and modernity: Proceedings of the 4th International Scientific Conference*. DonNTU.
29. Rozova, S.S. (1986). *Klasyfikatsionnaia problema v sovremennoi nauke [Classification problem in modern science]*. Nauka.
30. Shinkarenko, V.F., Shimanska, A.A. (2015). *Slovnnyk iz strukturnoi i henetychnoi elektromekhaniky [Dictionary of structural and genetic electromechanics]*. NTUU "KPI".
31. Bourbaki, N.N. (1963). *Ocherky po ystoriy matematyky [Essays on the history of mathematics]*. III.
32. Inge-Vechtomov, S. (2004). Poysky peryodycheskoi systemy... v evoliutsyy [Searches for the periodic system... in evolution]. *Nauka iz pervykh ruk – Science at first hand*, 2(3), 21-25.
33. Popov, I.Yu. (2008). *Peryodycheskiye systemy y peryodycheskyi zakon v byolohyy [Periodic systems and periodic law in biology]*. Publisher: KMK.
34. Shinkarenko, V.F. (2019). Izomorfizmy porozhdaiushchikh sistem (na primere elektromagnitnoi y chyslovoi) [Isomorphisms of generating systems (using the example of electromagnetic and numerical)]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy-saving systems*, 1, 46–55.
35. Balashov, E.P. (1985). *Evoliutsionnyi sintez sistem [Evolutionary synthesis of systems]*. Radio and Communications.
36. Kuznetsov, Yu.N., Gera Khamuyela, Zh.A., Hamuyela, T.O., Kuznetsov Yu.N. (Ed.). (2012). *Morfologicheskii sintez stankov i ikh mekhanizmov [Morphological synthesis of machine tools and their mechanisms]*. Gnosis LLC.
37. Kuznetsov, Yu.M. (2017). Maibutnie verstatobuduvannya – sertsevyny mashynobuduvannya Ukrainy v umovakh INDUSTRY-4.0 [The future of machine-tool construction is the core of machine-building in Ukraine under the conditions of INDUSTRY-4.0]. *Obladnannia i tekhnologii suchasnoho mashynobuduvannya – Equipment and technologies of modern mechanical engineering: Proceedings of the All-Ukrainian science and practice conference* (pp. 15-18).
38. Bartashevska, Yu.M. (2010). Rozvytok mashynobuduvannya Ukrainy: stan, problemy, perspektyvy [The development of mechanical engineering in Ukraine: state, problems, prospects]. *Yevropeyskyi vektor ekonomichnoho rozvytku – European vector of economic development*, 1, 19-25.
39. Shynkarenko, V., Kuznetsov, Yu., Soos, L., Shymanska, A., Kotliarova, V., Krasovskyi, P. (2022). The Principle of Hybridization in the Structural Organization and Evolution of Electromechanics Objects [The Principle of Hybridization in the Structural Organization and Evolution of Electromechanics Objects]. *Journal of Mechanical Engineering – Journal of Mechanical Engineering*, 72(2), 173–188.
40. Shinkarenko, V.F., Kuznetsov, Yu.M., Krasovskyi, P.O., Gutnyk, A. (2023). Innovatsiinyi syntez prostorovykh skhem hibrydnykh elektromekhanichnykh system dlia motor-shpyndelnykh ahrehativ z adaptyvnoiu prostorovoio strukturoio [Innovative synthesis of spatial schemes of hybrid electromechanical systems for motor-spindle units with an adaptive spatial structure]. *Elektromekhanichni systemy, metody optymizatsii ta modelivannia – Electromechanical systems, methods of optimization and modeling*, 2, 8-18.

41. Shinkarenko V.F., Gaidayenko Yu.V., Kobzenko L.M., Otrishko P.V. (2014). Rozpiznavannia henetychnykh prohram funktsionalnoho klasu skladnykh elekt-romekhanichnykh system za informatsi-ieiu yoho dovilnoho predstavnyka [Recognition of genetic programs of the functional class of complex electromechanical systems based on the information of its arbitrary representative]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy-saving systems, 1*, 57–65.

Отримано 14.02.2024

UDC 621.313

Vasyl Shynkarenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Electromechanics
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: svf1102@gmail.com, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5054-823X>

Researcher ID: [AAK-3777-2020](https://orcid.org/AAK-3777-2020), **SCOPUS Author ID:** [7005550726](https://orcid.org/7005550726)

CONCEPTION OF GENETIC CORE IN STRUCTURAL ORGANISATION AND EVOLUTION OF COMPLEX ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

The interdisciplinary aspect in the study of the core concept in complex genetically organized systems of natural and anthropogenic origin is analyzed. The purpose of the article is scientific substantiation of the nature and essence of the genetic core of the electromechanical system. Based on the provisions of the theory of genetic evolution of electromechanical systems, the information essence of the genetic core as a carrier of genetic information of the primary source of the electromagnetic field is revealed. The analysis of the invariant relationships of the genetic nucleus with the structure of groups, subgroups and small periods, the generative system was carried out. An invariant connection between the core concept and the processes of evolutionary speciation and the main taxonomic categories of electromechanical systems has been established. Based on the results of the system-genetic analysis, a definition of the concept of the genetic core is proposed. The relationship between genetic and energy cores in the hierarchy of levels of complexity of electromechanical systems is studied. The principles of genetic structuring of complex systems of the multinuclear type are revealed. According to the results of the system-genetic analysis of the conception of the genetic core of electro-mechanical systems, its main properties are summarized. The importance of the obtained research results for the spread of genetic prediction technology and interdisciplinary synthesis to complex electromechanical complexes with nuclei of different physical nature is emphasized.

Keywords: *electromechanical systems; complexity; reproductive system; genetic core; genetic information; electromagnetic chromosome; genetic code; invariance; hierarchy; multicore; synthesis; evolution.*

Table: 2. Fig.: 5. References: 41.

**Oleksandr Hlushko¹, Nataliia Lysenko², Kateryna Novyk³,
Robert Stala⁴, Zbigniew Waradzyn⁵, Serhii Stepenko⁶**

¹Junior Researcher, Department of Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: sashahlushkovo@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4109-8764>

²Junior Researcher, Department of Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: natali1701@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9108-6003>

³Junior Researcher, Department of Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: ekaterinanovik965@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5676-4606>

⁴Full Professor, Dr., Department of Power Electronics and Energy Control Systems
AGH University of Krakow (Krakow, Poland)

E-mail: stala@agh.edu.pl. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7432-0539>

⁵Associate Professor, Dr., Department of Power Electronics and Energy Control Systems
AGH University of Krakow (Krakow, Poland)

E-mail: waradzyn@agh.edu.pl. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5830-5873>

⁶Leading Researcher, PhD, Department of Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>

REVIEW OF TOP ENERGY TRANSITION INNOVATORS IMPACTING RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT

The list of TOP 100 energy transition innovators draws on Reuters Events' expertise as the world's leading provider of cleantech events. The main purpose of this review is to analyze the presented innovators and their main contributions towards energy transition as well as to emphasize those cases which are specifically dedicated to the renewable energy development, including solar systems, components and appropriate services. The main emerging trends shown and discussed in the review include Digital solutions, Decarbonization, Wind power, Just transition, Collaboration and partnerships, Hydrogen, Carbon capture, Novel technology, Green finance and Energy storage.

Keywords: *emerging trends; institutions and innovation ecosystems; solar systems; strategic innovations; technological changes; technological foresight; technology entrepreneurship; renewable energy; power electronics.*

Fig.: 8. References: 56.

Relevance of the research. Innovation is key to the energy transition as global greenhouse gas emissions continue to mount and the window for meaningful climate action closes. For the second year running, Reuters Events has wanted to recognize some of the many organizations innovating to save the planet from catastrophic climate change. The list of TOP 100 energy transition innovators draws on Reuters Events' expertise as the world's leading provider of cleantech events. The list divided into 10 categories with 10 organizations in each that have made notable contributions to the energy transition [1]. Many of the organizations listed have been attended the Reuters Events Global Energy Transition event in New York, United States, on June 07-08, 2023.

Problem statement. This study is performed in the frame of the research project "The maximum efficiency assurance of autonomous electrical power systems for special applications based on photovoltaic converters" #0123U100975 supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Research objective. The main purpose of this review is to analyze the presented innovators and their main contributions towards energy transition as well as to emphasize those cases which are specifically dedicated to the renewable energy development, including solar systems, components and appropriate services.

The statement of basic materials. The rest of this review, is structured as follows: Section I represents Digital solutions, Section II is devoted to Decarbonization, Section III is dedicated to Wind power, Section IV describes Just transition, Section V discusses Collaboration and

partnerships, Section VI is devoted to Hydrogen, Section VII tells about Carbon capture, Section VIII presents Novel technology, Section IX is devoted to Green finance, Section X describes Energy storage, Section XI represents power electronics in energy systems.

Digital solutions. GE Digital is a subsidiary of the American multinational conglomerate corporation General Electric. GE Digital's primary focus is to provide industrial software and services in four markets: Manufacturing applications serving discrete and process industries; Electric and Telecommunications Utilities; Oil & Gas industry; Power generation (gas, steam, solar, wind, hydro and related balance of plant operations and service support) [2].

Generating renewable energy depends on reliably forecasting the weather and its impact on wind and solar power generation. The IBM Environmental Intelligence Suite uses data and advanced analytics from The Weather Company®, an IBM Business, to create the most accurate weather forecasts in the world, which helps power companies to plan generation and maintenance schedules more effectively and efficiently [3].

IBM Environmental Intelligence Suite combines AI with weather, climate, and operational data into a single solution to provide more accurate information about the environment under study. In addition, the program allows you to gain insight into potential disruptions and prioritize mitigation and response actions [4].

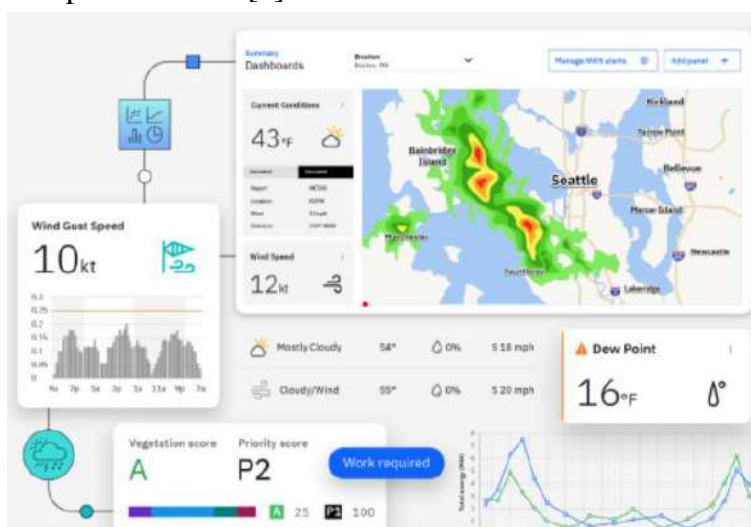


Fig. 1. SaaS platform to monitor, predict, and respond to weather and climate impact [4]

Octopus Energy Group is a British renewable energy group specializing in sustainable energy. Kraken Flex is a cloud-based platform that controls distributed energy assets with machine learning and artificial intelligence to match supply and demand. This helps the electricity grid deal with the natural volatility of renewable generation [5].

Decarbonization. Vattenfall is a Swedish multinational power company. As of 2019, renewables accounted for 35 % of the firm's total generation capacity, including wind, solar and hydro power [6].

Schneider Electric and Walmart Inc., the leaders in the digital transformation of energy management and automation. The groundbreaking initiative, called the Gigaton PPA (GPPA) Program, is designed to educate Walmart suppliers about renewable energy purchases and accelerate renewable energy adoption by participating suppliers through aggregate power purchase agreements (PPA) [7; 8].

Engie is a French multinational utility company, which operates in the fields of energy transition, electricity generation and distribution, natural gas, nuclear, renewable energy and petroleum. It is one of the few players in the sector to develop expert skills in both upstream (engineering, purchasing, operation, maintenance) and downstream (waste management, dismantling) activities [9].

Hitachi is co-creating global and local solutions to solve the global challenge of an inclusive and equitable carbon-neutral future. They are advancing the world's energy system to be more sustainable, flexible and secure. As the pioneering technology leader, they collaborate with customers and partners to enable a sustainable energy future – for today's generations and those to come [10].

TC Energy is a major North American energy company that develops and operates energy infrastructure in Canada, the United States, and Mexico. The company operates three core businesses: Natural Gas Pipelines, Liquids Pipelines and Energy. The company is expanding its energy division to include more renewable sources including pumped storage, wind, and solar generation [11].

Solar energy to power TC Energy renewable natural gas (RNG) interconnects – meter stations (Fig. 2), that measure the amount of gas being transported – is helping the company to work towards our net-zero commitment while also enabling the company to sell renewable energy to the local utility. The company uses multiple wind and solar PPAs to decarbonize operations [12].



Fig. 2. Meter stations that measure the amount of gas being transported

Wind power. Massachusetts Institute of Technology (MIT). Working with experts from turbine maker Siemens Gamesa and developer ReNew Power, MIT researchers have found a way to improve wind farm output by 1.2%—at no cost. The benefit can be achieved by modeling the wind flow of an entire collection of turbines and optimizing the control of individual units accordingly, the researchers found [13].

Acciona Energía is a company dedicated to providing solutions based on renewable energy, with the goal of contributing to the decarbonization of the planet [14].

GE Renewable Energy is a manufacturing and services division of the American company General Electric. They focus on the production of energy systems that use renewable sources. Its products include wind (onshore and offshore), hydroelectric and solar (concentrated and photovoltaic) power generating facilities. It is the world's largest wind turbine manufacturer [15].

As the world's top-class wind turbine manufacturer and clean energy integrated solution provider, Mingyang Smart Energy is dedicated to the green and intelligent energy to benefit the world. They engage in the wind energy and solar energy sectors, ranking the 40th among the World Top 500 New Energy Enterprises and the 1st in offshore wind innovation [16].

Siemens Gamesa Renewable Energy is a Spanish-German wind engineering company. The Services Commercial Office manufactures wind turbines and provides onshore and offshore wind services. It is the world's second largest wind turbine manufacturer. The company is notable for its SG 14.0-222 wind turbine, the largest variant based on the Siemens D7 Platform, as well as being the largest wind turbine in the world [17].

SSE Renewables is an energy company, which develops and operates onshore and offshore wind farms and hydroelectric generation in the United Kingdom and Ireland [18].

Vattenfall. As of 2019, renewables accounted for 35% of the firm's total generation capacity, including wind, solar and hydro power. Vattenfall also operates biomass and other power plants in Germany and the Netherlands [19].

Just transition. As part of the Powering Past Coal Alliance, the Canadian government has committed to banning new thermal coal mining and ending coal fired power generation. The Powering Past Coal Alliance (PPCA) is a group of countries, cities, regions and organizations aiming to accelerate the fossil-fuel phase out of coal-fired power stations, except the very few which have carbon capture and storage. The project was undertaken with financial support from the Government of Canada, through their environmental department known as Environment and Climate Change Canada [20].

Eni is a global energy company, active at every stage of the value chain: from natural gas and oil to co-generated electricity and renewables, including both traditional and bio refining and chemicals [21].

European Commission. The Just Transition Platform (JTP) provides a single access point to support and knowledge on Europe's transition to a sustainable, climate-neutral economy. The Platform is the EU's key tool to help Member States and regions unlock the support available through the Just Transition Mechanism, ensuring a fair and 'just' transition that leaves no person or region behind [22].

SSE is a leading generator of renewable electricity and one of the largest electricity network companies in the United Kingdom. They develop, own and operate low carbon infrastructure to support the zero-carbon transition. This includes onshore and offshore wind, hydro power, electricity transmission and distribution grids, and efficient gas-fired generation, alongside providing energy products and services for businesses [23].

Collaboration and partnerships. Hydrogen Import Coalition. This collaboration between DEME, Engie, Exmar, Fluxys, the Port of Antwerp, the Port of Zeebrugge and WaterstofNet has carried out important research into the feasibility of large scale imports of low-carbon hydrogen into Europe [24].

Asian Renewable Energy Hub (AREH), comprising 7.5GW of wind and 3.5GW of solar power generation capacities, is one of its kind and one of the most significant world hybrid power projects planned, and it's expected to generate 40TWh of clean electricity a year. A 14,000km² site with 8.2m/s average wind speed and 2,450kWh/m² solar power generation potential was selected for the hybrid energy project [25].

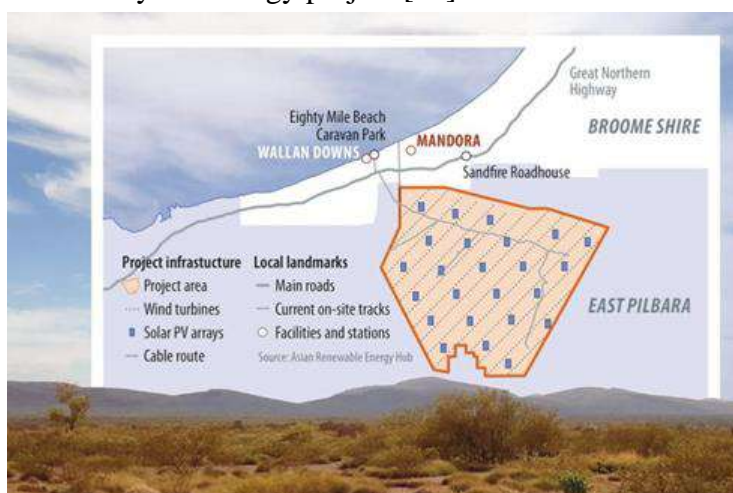


Fig. 3. AREH project map

Antwerp@C is a project dedicated to innovative CO₂ reduction. Together with seven leading chemical and energy companies, Antwerp@C are working on the transition to a circular and climate neutral port [26].

Siemens Gamesa wind engineering company manufactures wind turbines and provides onshore and offshore wind services. It is the world's second largest wind turbine manufacturer [27].

Hydrogen. Aqua Ventus' project sets standards and is unique in the energy landscape of Germany and Europe. The initiative is made up of highly innovative organizations and research institutions as well as leading international companies that are proclaiming a new era of climate-friendly energy with the production of green hydrogen at sea. The overarching goal of Aqua Ventus is to install 10 GW of green hydrogen generation capacity from offshore wind energy in the North Sea by 2035 and to establish an associated transport infrastructure [28].

HY2GEN AG develops, finances, builds, and operates plants for the production of green hydrogen, green ammonia, and hydrogen-based e-fuels worldwide. These products are used to create CO₂-free or CO₂-neutral and competitive fuels and industrial solutions. The first plants are being built in France, Norway, Canada, and Germany. Hy2gen's goal is to become the market leader in the production of green hydrogen, green ammonia, and green e-fuels for mobility, agriculture, and industry [29].

CWP Global is a leading renewable energy developer. The mission is to improve the environment for current and future generations by leading the transition to renewable energy [30].

For over 30 years, Toyota has invested significantly in its world-leading fuel cell technology. Instead of using power from electricity stored in a battery, hydrogen fuel cell electric vehicles (FCEVs) generate their electricity through a chemical reaction between hydrogen and oxygen in a fuel cell stack. It's a process that leads to zero emissions apart from water. Fuel cell electric vehicles (FCEVs) powered by hydrogen have a unique role in the decarbonisation of transport and the wider economy [31].

U.S. Department of Energy. The HydroGEN Advanced Water Splitting Materials consortium aims to accelerate the research, development, and demonstration of advanced water splitting technologies for clean, sustainable hydrogen production. HydroGEN is a consortium of six U.S. Department of Energy (DOE) national laboratories that will address advanced water splitting materials challenges by making unique, world-class national lab capabilities in photoelectrochemical, solar thermochemical, and low- and high-temperature electrolytic water splitting more accessible to academia, industry, and other national labs [32].

Carbon capture. Baker Hughes Company is one of the world's largest oil field services companies. The company provides products and services for oil well drilling, formation evaluation, completion, production, and reservoir consulting. They design, manufacture and service transformative technologies to help take energy forward [33].

Aker Solutions delivers integrated solutions, products and services to the global energy industry. They enable low-carbon oil and gas production and develop renewable solutions to meet future energy needs. By combining innovative digital solutions and predictable project execution, they accelerate the transition to sustainable energy production [34].

C-Capture was founded as a spin-out company from the School of Chemistry at the University of Leeds. C-Capture has patented a unique, solvent-based technology that offers a safe, low-cost way to remove carbon dioxide from emissions using a post-combustion capture approach [35].

Chevron Corporation is an American multinational energy corporation predominantly in oil and gas. Within oil and gas, Chevron is vertically integrated and is involved in hydrocarbon exploration, production, refining, marketing and transport, chemicals manufacturing and sales, and power generation [36].

Saipem is an Italian multinational oilfield services company and one of the largest in the world. Saipem is an advanced technological and engineering platform for the design, construction and operation of safe and sustainable complex infrastructure and plants. Saipem has always been oriented towards technological innovation and is currently committed, alongside its clients, on the frontline of energy transition with increasingly digitalised tools, technologies and processes that were devised from the outset with environmental sustainability in mind [37].

Novel technology. Twelve is the carbon transformation company. Their technology is a new breed of electrochemical reactor that works like industrial photosynthesis. Just like a plant uses CO₂, water and sunlight to make useful carbon-based products, they use CO₂, water and renewable energy to make chemicals, materials and fuels that are made from refining fossil fuels [38].

Shell uses blockchain to track the source of renewable energy and allocate sustainable aviation fuel purchases for air travel. Shell Energy partners with AMPYR Australia on a 500MW/1000MWh battery located in Wellington. It will be support renewable generation and contribute to improved reliability for the grid and consumers (Fig. 4) [39].



Fig. 4. Wellington battery energy storage system (BESS)

Heineken has committed to grow the proportion of renewable energy it uses to 70% by 2030 via renewable energy initiatives around the world. Now they have 12 biomass projects in operation around the world, together supplying over 6% of HEINEKEN'S global energy demand for production [40].

Norwegian Crystals manufactures ultra-low-carbon monocrystalline ingots, brick, and wafers for PV. Using a high-precision process, cylindrical silicon ingots are cut into bricks, then processed by partners to create silicon wafers. The process is fully powered by hydro with the addition of natural cooling water from the local glacier, Svartisen [41].

Studio Mom developed the LAVO bike, a compact modular transport concept powered by green hydrogen. They designed it as a toolkit for a new emission-free mode of transport. LAVO developed the 1st commercial home hydrogen system. It fills small tanks with hydrogen using water and solar energy [42].

Green finance. Union Bancaire Privée (UBP) have a responsibility and great potential to contribute to the global effort to tackle environmental problems through their investment decisions. At the same time, UBP strives to lead by example, managing the environmental impact of their own operations [43].

Bluefield Solar Income Fund is an investment company focused on the acquisition and long term management of a diversified portfolio of low carbon assets in the UK. This is the first investment company focused on solar PV to be listed on a major stock exchange [44].

Impax Asset Management is a specialist asset manager based in London, England. Impax is one of the longest established private markets managers in the large and rapidly growing renewable energy sector. The firm manages three new energy funds that follow an industrially-focused value-add strategy, investing in renewable power generation and related assets [45].

S&P Global is an American publicly traded corporation. Its primary areas of business are financial information and analytics. The S&P Global Clean Energy Index is designed to measure the performance of companies in global clean energy-related businesses from both developed and emerging markets, with a target constituent count of 100 [46].

Energy storage. Polar Night Energy. The project embraces renewable energy by providing stable and affordable heat storage for district heating and industrial applications. A heat transfer system was built inside the sand, which ensures a long storage period, from hours to months, with minimal heat loss. There is a heat storage system with a thermal capacity of 2 MW with a capacity of 300 MW/h or 10 MW with a thermal capacity of 1000 MW/h.

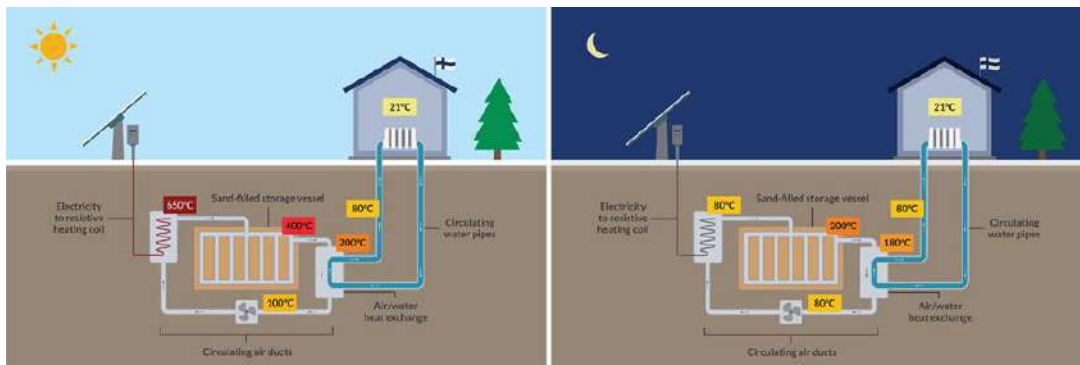


Fig. 5. A schematic of the components and operating cycle of the Polar Night Energy system [47]

Hydrostor provides grid-scale electricity storage by storing renewable energy as compressed air. The technology offers the same services as a natural gas plant while having zero emissions using surplus electricity as fuel [48].

Mission ESS is to accelerate global decarbonization by providing safe, sustainable, long-duration energy storage that powers people, communities and businesses with clean, renewable energy anytime and anywhere it's needed. As more renewable energy is added to the grid, long-duration storage is essential to providing the reliability and resiliency when the sun is not shining and the wind is not blowing [49].

The Tesla Megapack is large-scale rechargeable Li-ion battery stationary energy storage product, intended for use at battery storage power stations, manufactured by Tesla Energy. Designed to be deployed by utility companies, Megapacks can be used to store energy generated by intermittent renewable power sources, such as solar and wind. Tesla Energy also offers smaller battery energy storage devices: the Powerwall, intended for home use, and the Powerpack, intended for use by businesses or on smaller power utility projects [50].

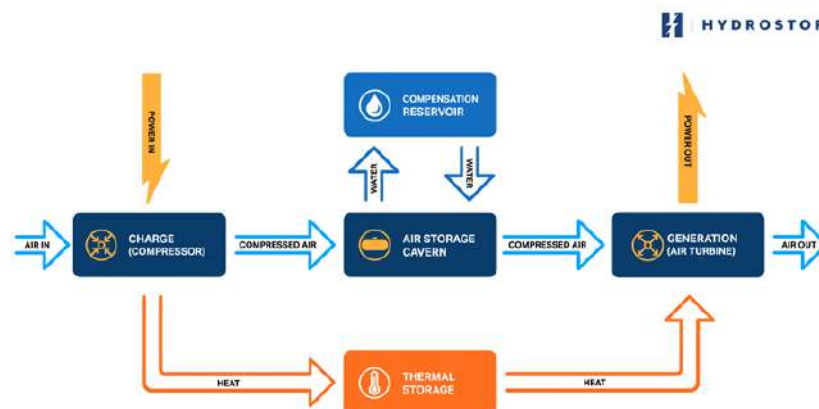


Fig. 6. The diagram of the A-CAES Process Flow

Power electronics. Paper [51] describes the role of power electronics, future trends in terms of power semiconductors, reliability, advanced control, grid-forming operation, and security issues for renewable energy integration.

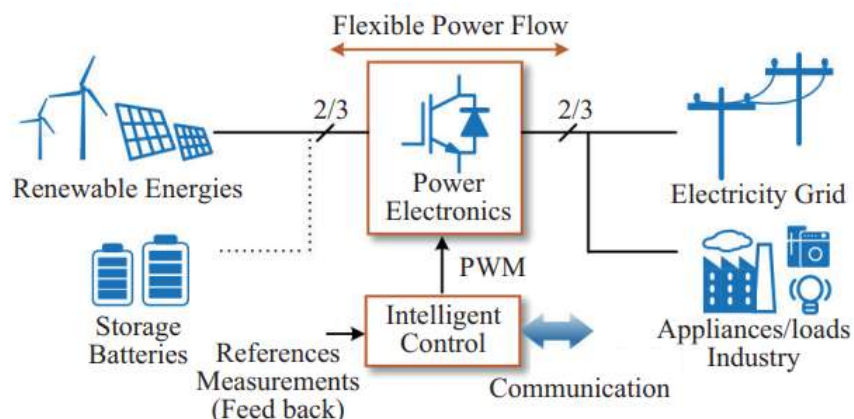


Fig 7. Configuration of a typical grid-connected RES with power electronics converters and intelligent control

In article [52] describes the evolution of power semiconductor devices technologies, general types of power converters for Large-Scale renewable energy generation such as: two-level inverter and three-level neutral-point clamped inverter, Typical configurations of large-scale for PV and wind turbines power generation systems.

Study [53] is to present a comprehensive review of wind-solar hybrid renewable energy source, such as power architectures, mathematical modeling, power electronic converter topologies, and design optimization algorithms.

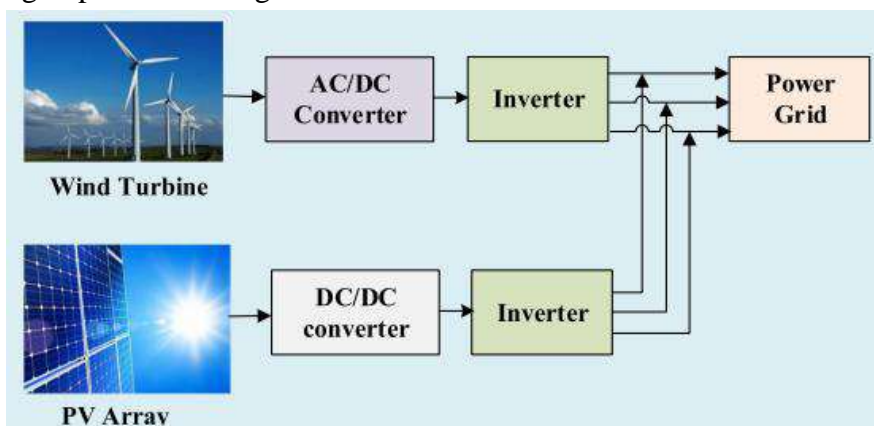


Fig 8. Scheme diagram of power architectures for hybrid renewable energy source

Article [54] describes the hybrid energy storage systems in photovoltaic energy sources and analyzes the important aspects of capacity sizing, power converter topology and strategies management. This paper focuses combine two storage technologies energy: high energy and high power.

Paper [55] describes energy systems with variable photovoltaic power source. Controls that trade off energy production against variability are presented.

Publication [56] characterizes the general development of power electronics, emerging trends, and aspects that will be important in the future when designing converter systems. In addition to an increase in energy conversion efficiency and CO₂ emission reduction, there is a problem of waste leading to the need of designing converter subsystems also for "Repairability and Circularity". The reduction of wasted energy and the environmental impact is taken into account by considering the entire life cycle of the converters. This can mean a new approach to design and converter optimization.

Conclusions. The representatives of the TOP Energy Transition Innovators and their contributions were analyzed in this review. It was found, that most of the presented institutions and innovation ecosystems are directly dedicating their efforts to the renewable energy development. Some of them have specific interests and achievements in the field of solar systems as well as their components and services.

The main emerging trends shown and discussed in the review include Digital solutions, Decarbonization, Wind power, Just transition, Collaboration and partnerships, Hydrogen, Carbon capture, Novel technology, Green finance and Energy storage.

It is worth noting that solar energy was not directly included in the list of selected directions. Although it is one of the main types of renewable energy sources, along with wind and hydrogen energy. At the same time, a significant part of representatives of innovators are directly involved in the field of solar energy in their activities.

The presented companies provide their services and distribute technologies on the European, North American, Australian and Asian continents. Each of them strives for the efficiency of its activities by reducing emissions, new methods of energy storage and transmission, the latest digital solutions, energy management and increasing the efficiency of power electronics. As a result, only the technological and functional solutions that were presented remain on the world market.

For the purposes of future research and as further technological forecasting, it is worth emphasizing that the development of tools and services for solar energy and the construction of photovoltaic power supply systems is practically impossible by itself without taking into account and integrating such fields of innovations as Digital solutions, Decarbonization, Collaboration and partnerships, Novel technology, Green finance and Energy storage. Further work will be devoted to research on the construction of highly-efficient power supply systems based on photovoltaic converters, in particular, taking into account the further joint development of the mentioned innovative areas.

This study is carried out within the framework of the research projects “The maximum efficiency assurance of autonomous electrical power systems for special applications based on photovoltaic converters” #0123U100975 and “Multi-agent system for the protection of critical infrastructure based on a swarm of multi-copter drones” #0123U101819 supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine. This research is also partially supported by the program “Excellence initiative – research university” for the AGH University of Krakow.

References

1. The Top 100 Energy Transition Innovators Report 2023. (2023). https://1.reuters-sevents.com/LP=33884?utm_campaign=5902-15NOV22-WK30-Content%20Autoresponder&utm_medium=email&utm_source=Eloqua&elqTrackId=638c2d1851b246e7bfe73b86a9ccc05d&elq=c0b6a026e4a142daa4e814e652efbdcdb&elqaid=77943&elqat=1&elqCampaignId=
2. American multinational conglomerate corporation General Electric. <https://www.ge.com/digital/>
3. The IBM Environmental Intelligence Suite. <https://www.ibm.com/us-en>.
4. SaaS platform to monitor, predict, and respond to weather and climate impact. Figure from site. https://www.ibm.com/content/dam/connectedassets-adobe-cms/worldwide-content/cdp/cf/ul/g/9d/c7/EIS-Overview.component.l.ts=1686159651107.png/content/adobe-cms/us/en/products/environmental-intelligence-suite/jcr:content/root/leadspace_container/leadspace.
5. Octopus Energy Group. <https://octopus.energy>.
6. Vattenfall - Swedish multinational power company. <https://group.vattenfall.com>.
7. Schneider Electric Ukraine. <https://www.se.com/ua/uk>.
8. Walmart Inc. <https://www.walmart.com>.
9. Engie - French multinational utility company. <https://www.engie.com/en>.
10. Hitachi energy. <https://www.hitachienergy.com>.
11. TC Energy. <https://www.tcenergy.com>.
12. Figure of Meter stations that measure the amount of gas being transported. <https://www.tcenergy.com/stories/2022/2022-08-18-renewable-energy-powering-renewable-energy>.
13. Massachusetts Institute of Technology. <https://www.mit.edu>.

14. Acciona Energía. https://www.acciona-energia.com/?_adin=02021864894.
15. GE Renewable Energy. <https://www.ge.com/renewableenergy>.
16. Mingyang Smart Energy. <http://www.myse.com.cn/en>.
17. Siemens Gamesa Renewable Energy. <https://www.siemensgamesa.com/en-int>.
18. SSE Renewables. <https://www.sserenewables.com>.
19. Vattenfall company. <https://group.vattenfall.com>.
20. The Powering Past Coal Alliance. <https://poweringpastcoal.org>.
21. Eni company. <https://www.eni.com/en-IT/home.html>.
22. Just Transition Platform. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal/just-transition-mechanism_en.
23. SSE company. <https://www.sse.com/sustainability/just-transition>.
24. WaterstofNet. <https://www.waterstofnet.eu/en/knowledge-centre/roadmaps-and-studies/h2-importcoalition>.
25. Figure of Asian Renewable Energy Hub. https://www.pv-magazine-australia.com/wp-content/uploads/sites/9/2021/04/04033_Asia_Hub2_3sp-1.jpg.
26. Antwerp@C project. <https://www.portofantwerpbruges.com/en/our-port/climate-and-energy-transition/antwerpc>.
27. Siemens Gamesa wind engineering company. <https://www.siemensgamesa.com/en-int>.
28. Aqua Ventus project. <https://aquaventus.org>.
29. HY2GEN company. <https://hy2gen.com>.
30. CWP Global company. <https://www.cwp.global>.
31. Toyota company. <https://www.toyota-europe.com/electrification/fcev>.
32. U.S. Department of Energy. <https://www.energy.gov>.
33. Baker Hughes company. <https://www.bakerhughes.com>.
34. Aker Solutions. <https://www.akersolutions.com>.
35. C-Capture company. <https://c-capture.co.uk>.
36. Chevron Corporation. <https://www.chevron.com>.
37. Saipem services company. <https://www.saipem.com/en>.
38. Twelve company. <https://www.twelve.co>.
39. Figure of Wellington battery energy storage system https://shellenergy.com.au/wp-content/uploads/2022/10/Wellington-BESS-article_Half-card_752x580-700x540.jpg.
40. Heineken company. <https://www.theheinekencompany.com>.
41. Norwegian Crystals manufactures. Figure of using a high-precision process. <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5ffb453ba24aef1e5b938e62/1629108541217-UCVS16N71N0KUHWMPE4U/Wafer+klargj%C3%B8ring+forsendelse+mai+2021.jpg?format=500w>.
42. Studio Mom company. <https://www.studiomom.nl/en>.
43. Union Bancaire Privée. <https://www.ubp.com/en>.
44. Bluefield Solar Income Fund company. <https://bluefieldsif.com>.
45. Impax Asset Management. <https://impaxam.com>.
46. S&P Global corporation. <https://www.spglobal.com/en>.
47. Figure of the Polar Night Energy system <https://cdn.comsol.com/stories/2022/105101/polar-night-energy-system-schematic.png>.
48. Hydrostor company. <https://www.hydrostor.ca/technology>.
49. ESS company. <https://essinc.com>.
50. Tesla Megapack. <https://www.tesla.com/megapack>.
51. Tang, Z., Yang, Y. and Blaabjerg, F. (2022). Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 8(1), 39-52. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2021.02850>.
52. Blaabjerg, F., Yang, Y., Kim, K. A. and Rodriguez, J. (2023). Power Electronics Technology for Large-Scale Renewable Energy Generation. *Proceedings of the IEEE*, 111(4), 335-355. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2023.3253165>
53. Roy, P., He, J., Zhao, T. and Singh, Y. V. (2022). Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 3, 81-104. doi: 10.1109/OJIES.2022.3144093
54. Sutikno, T., Arsadiando, W., Wangsuphaphol, A., Yudhana, A. and Facta, M. (2022). A Review of Recent Advances on Hybrid Energy Storage System for Solar Photovoltaics Power Generation. *IEEE Access*, 10, 42346-42364. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165798>.

55. Krein, P. T. and Galtieri, J. A. (2021). Active Management of Photovoltaic System Variability With Power Electronics. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9, 6, 6507-6523. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.3006448>.

56. Kolar, J. W., Imperiali, L., Menzi, D., Huber, J., Musil, F. (2023). Net Zero CO₂ by 2050 is NOT Enough (!). *Keynote at the 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE - ECCE Europe)*, Aalborg, Denmark, September 4-8.

Отримано 05.02.2024

УДК 620.92

**Олександр Глушко¹, Наталія Лисенко², Катерина Новик³,
Стала Роберт⁴, Варадзин Збігнєв⁵, Сергій Степенко⁶**

¹ молодший науковий співробітник кафедри електричної інженерії, інформаційних та вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: sashahlushkovo@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4109-8764>

² молодший науковий співробітник кафедри електричної інженерії, інформаційних та вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: natali1701@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9108-6003>

³ молодший науковий співробітник кафедри електричної інженерії, інформаційних та вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: ekaterinanovik965@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5676-4606>

⁴професор, доктор кафедри силової електроніки та енергетичних систем керування AGH
Краківський університет (Краків, Польща)

E-mail: stala@agh.edu.pl. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7432-0539>

⁵доцент, доктор кафедри силової електроніки та енергетичних систем керування AGH
Краківський університет (Краків, Польща)

E-mail: waradzyn@agh.edu.pl. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5830-5873>

⁶провідний науковий співробітник, доцент кафедри електричної інженерії, інформаційних та вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>

ОГЛЯД КРАЩИХ ІННОВАТОРІВ В ЕНЕРГЕТИЦІ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РОЗВИТОК ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Список кращих новаторів у галузі енергетики базується на досвіді «Reuters Events» як провідного світового постачальника відновлюваних технологій. Проаналізувавши внесок наведених у цій статті новаторів, можна підкреслити їхню значущість у сприянні декарбонізації та зменшенні викидів парникових газів та розвитку відновлюваної енергетики. Основна мета даної оглядової статті — проаналізувати представлених новаторів та їхній основний внесок у перехід до енергетики, а також підкреслити ті випадки, які спеціально присвячені розвитку відновлюваної енергетики, що сприятиме просуванню даного напрямку в сучасному світі.

Серед найважливіших тенденцій варто відзначити такі: цифрові рішення, які сприяють оптимальному використанню ресурсів та зменшують негативний вплив на навколишнє середовище.

Декарбонізація, передбачає заміну використання вугілля та інших вуглеводнів на більш екологічно чисті джерела енергії, такі як енергія сонця, вітру та гідроенергетика. Це дозволить значно зменшити викиди парникових газів в атмосферу та зменшити негативний вплив на глобальне потепління.

Енергія вітру та сонця або розвиток вітро- та сонячної енергетики також є важливими напрямками у сучасній енергетиці. Нові технології та масове виробництво дозволяють зробити їх більш ефективними та доступними для широкого кола споживачів.

Співпраця та партнерство стають все більш важливими для успішного вирішення складних проблем сфери енергетики. Співпраця між компаніями, керівництвом країн та кінцевими споживачами є важливими для успішного впровадження інновацій в енергетиці. Спільні зусилля можуть забезпечити стабільну роботу та постійний розвиток енергетичної системи.

Водень та водневі технології є перспективними напрямками розвитку, які можуть значно розширити перспективи використання енергії та зробити її більш ефективною.

Зберігання енергії дозволяє ефективно розподіляти ресурси – накопичувати, коли є надлишок генерації і віддавати електроенергію, коли виникає дефіцит.

Силова електроніка дозволяє ефективно перетворювати отриману енергію з відновлюваних джерел для використання її кінцевими споживачами.

Ключові слова: нові тенденції; інститути та інноваційні екосистеми; сонячні системи; стратегічні інновації; технологічні зміни; технологічне передбачення; технологічне підприємництво; відновлювальна енергія; силова електроніка.

Рис.: 8. Бібл.: 56.

**Володимир Кудряшов¹, Анатолій Любимов², Олег Лещенко³,
Світлана Добровольська⁴, Ольга Кисельова⁵**

¹старший викладач кафедри електроніки, транспортних технологій та логістики
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку (Одеса, Україна)
E-mail: 067k9670511@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7457-0255>

²старший викладач кафедри електроніки, транспортних технологій та логістики
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку (Одеса, Україна)
E-mail: anatoliylubimov@ukr.net

³кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електроніки, транспортних технологій та логістики
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку (Одеса, Україна)
E-mail: olegleshchenko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8529-8296>

⁴старший викладач кафедри електроніки, транспортних технологій та логістики
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку (Одеса, Україна)
E-mail: dobrsv1@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6897-9022>

⁵кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, транспортних технологій та логістики
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку (Одеса, Україна)
E-mail: kiselovao@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9031-8781>

МОДЕЛЬ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБЛАДІВ ТА СИСТЕМ

У статті розкриваються характеристики, призначення та принцип дії розробленої моделі універсальної лабораторної установки дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем, з забезпеченням можливості роботи установки з комп'ютерним та програмним забезпеченням. Установка може використовуватися замість декількох вимірювальних приладів, що дозволяє більш якісно виконувати дослідження. Її елементи дозволяють інтегрувати їх зв'язок за допомогою інтерфейсу та оптимізувати процес дослідження шляхом використання необхідного програмного забезпечення; фізичні вимірювання параметрів і характеристик моделей електронних пристроїв та систем проводяться за допомогою програмного забезпечення, наприклад, на базі програми схемотехнічного моделювання «MULTISIM».

Ключові слова: електронні прилади; електронні пристрої; системи; модель універсальної лабораторної установки; програмне забезпечення; дослідження; випробування; діагностика.

Рис.: 2. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. На сучасному етапі розвитку науки, техніки та інформаційних технологій, все більше уваги приділяється цифровізації виробництва, проте досі існує багато технологічних процесів в різних галузях виробництва, які неможливі без застосування електронних приладів, які забезпечують використання електричної енергії та її перетворення. Електронні пристрої, прилади та системи є основою автоматизації технологічних процесів виробництва та ефективно використовуються у всіх його сферах [1]. Кількість і варіативність електронних інформаційних та автоматичних пристроїв значно збільшилась в останні десятиліття. Завдяки розвитку інтегральних технологій, створюються пристрої для автоматизації виробництва, окремих вузлів і процесів, вимірювальна техніка, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі тощо.

Постановка проблеми. Сучасний електронний блок, завдяки використанню типових електронних вузлів, можна зібрати без детального розрахунку його окремих складових. Потрібно лише правильно дібрати відповідні інтегральні мікросхеми, поєднати їх та забезпечити належний зворотний зв'язок [2]. Усе це вимагає розуміння принципів функціонування окремих елементів, побудови пристроїв та систем, що складаються з великої кількості елементів [3]. Слід враховувати також, що більшість сучасних пристроїв та систем містять цифрові компоненти наряду з аналоговими, це призводить до необхідності узгодження їх параметрів [4].

Дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем із застосуванням лабораторних установок з використанням комп'ютерного та програмного забезпечення дозволяють провести розрахунок роботи пристроїв у різних експлуатаційних

режимах, зібрати необхідні статистичні дані, провести досліди й розрахунки. Усе це підвищує якість засвоєння здобувачами вищої освіти навчального матеріалу, його практичне опрацювання, шляхом проведення дослідів і розрахунків під час лабораторних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Започатковуючи роботу з проектування та виготовлення універсальної лабораторної установки дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем ми проаналізували наявні експериментальні установки, які використовуються з аналогічною метою [5; 6]. Так, у лабораторних умовах широко використовуються такі установки, як переносна експериментальна установка «Універсальний стенд К4824» [7]; лабораторна установка для дослідження напівпровідників [8], яка дозволяє проведення лабораторних робіт з метою дослідження параметрів електронних приладів, зокрема напівпровідників, напівпровідникових діодів, а також лабораторна установка «Діалогова взаємодія з мікропроцесорною лабораторією КР580 ІК80» для дослідження мікропроцесорів [9] та інші подібні установки. Проаналізувавши принцип їхньої дії та характеристики, можна стверджувати, що вони мають суттєві недоліки, які ускладнюють роботу в сучасних умовах, зокрема вони не забезпечують зняття характеристик електронних пристроїв та систем і не мають можливості працювати з комп'ютерним та програмним забезпеченням.

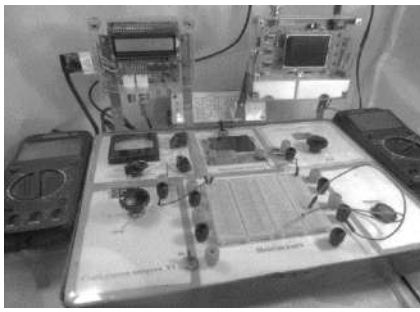
Виділення недосліджених частин досліджуваної проблеми. Враховуючи все вищезазначене, виникла потреба в створенні установки, яка б забезпечувала інтегрування можливостей віртуальних та фізичних досліджень параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем в лабораторних умовах, з можливістю проведення досліджень та аналізу їх результатів як фізично, так і віртуально.

Мета дослідження – розкрити характеристики, призначення та принцип дії розробленої моделі універсальної лабораторної установки дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем із забезпеченням можливості роботи установки з комп'ютерним та програмним забезпеченням.

Виклад основного матеріалу. Спроектвана й виготовлена модель універсальної лабораторної установки, належить до електроніки, зокрема вимірювання параметрів і характеристик електронних приладів та випробування пристроїв та систем. Вона призначена для дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем, шляхом введення в неї сучасних приладів на мікроконтролерах, що розширює можливості даної установки для дослідження електронних пристроїв та систем, з використанням комп'ютерного та програмного забезпечення.

Унікальність установки полягає у тому, що вона поєднує використання стабілізаторів постійної напруги і струму, мультиметра, мегатестера, осцилографа та генератору сигналів. Саме завдяки такому об'єднанню та наявності відповідних інтерфейсів установка дозволяє досліджувати характеристики електронних пристроїв та систем з використанням комп'ютера та відповідного програмного забезпечення. Суттєвими ознаками універсальної установки є наявність конструктивних деталей зв'язку між її елементами та їх взаємне розташування в переносному корпусі (рис. 1). Конструкція має модульний характер компонування блоків та компонується за вимогами необхідних досліджень. Понад усе, усі окремі вимірювальні прилади (модулі) мають поширені характеристики щодо визначення параметрів.

Параметри та характеристики елементів установки дозволяють інтегрувати їх зв'язок за допомогою інтерфейсу, що використовується – USB, а процес дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем – за рахунок використання необхідного програмного забезпечення. Зовнішній вигляд елементів установки подано на рис. 1.



а



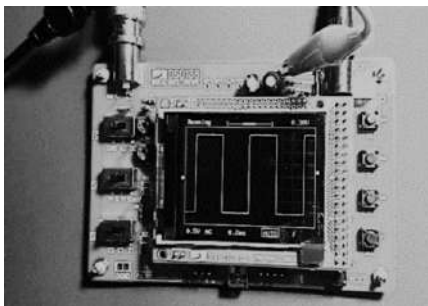
б



в



г



д



е

Рис. 1. Зовнішній вигляд лабораторної установки та її елементів
 а – зовнішній вигляд установки; б – стабілізатор постійної напруги на 24 В;
 в – стабілізатори напруги і струму; г – мега-тестер LCR – 4Т;
 д – осцилограф DSO 138; е – генератор сигналів DDS

Джерело: розроблено авторами.

Представлена модель універсальної лабораторної установки для дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем має ряд переваг, порівняно з аналогічними пристроями, зокрема щодо покращень характеристик установки можна віднести її модульну структуру та мобільність при виконанні задач дослідження; підвищення точності вимірювань, що проводяться при дослідженні; розширення можливостей при дослідженні електронних пристроїв та систем. Установка надає можливість проведення досліджень та аналізу їхніх результатів як фізично, так і віртуально, завдяки використанню сучасних інтерфейсів та з'єднання з персональним комп'ютером. Установка дозволяє скорочення часу на проведення досліджень через необхідності з'єднання окремих приладів, вивчення та урахування їхніх метрологічних характеристик та можливості визначення деяких параметрів автоматично, без додаткового математичного розрахунку.

За допомогою універсальної лабораторної установки (рис. 1) без додаткового переоснащення можуть досліджуватися параметри та характеристики наступних електронних приладів: напівпровідникових діодів, транзисторів, резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності, фотодіодів, світлодіодів, симисторів, оптронів, мікросхем. Це

підкреслює її універсальність та мобільність. При тому раніше для визначення характеристик, наприклад транзисторів необхідно було за визначеними параметрами проводити додаткові розрахунки. Похибка знятих характеристик складалась з похибки методу вимірювання, похибки кожного приладу за допомогою якого проведений вимір, додавалися похибки кінцевих обчислень. Таки параметри як коефіцієнт підсилення, напруга відкриття, розташування виводів прилад в установці надає одразу в остаточному вигляді. Якщо раніше в дослідженнях використовувалися окремі прилади з точністю від 1 до 2,5, то в установці застосовуються винятково цифрові прилади з точністю вимірювань до 1 відсотка та з поширеним діапазоном.

Для цього використовується мега-тестер LCR – 4T (рис. 1, з), на вхід якого підключається електронний прилад (діод, транзистор, резистор...), значення параметрів висвітлюється на екрані мега-тестера. Визначення таких параметрів як внутрішній опір конденсатора, ємність діода, коефіцієнти підсилювання транзистора, напруга відкриття переходу раніше вимагали окремих вимірювань та обчислювань. Цей модуль може одразу визначити призначення виводів та одразу роботоспроможність приладу.

Дослідження характеристик електронних пристроїв та систем здійснюється за допомогою генератора сигналів DDS (рис. 1, е), з виходу якого сигнал подається на схему пристрою (системи), що досліджується (підсилювача, перетворювача, компаратора, фільтра, імпульсного пристрою), що збирається на макетній платі установки або вже зібраний заздалегідь. Прилад має дуже гарні характеристики за діапазоном частоти від 1 Гц до 8 МГц та амплітудою до 14 вольтів; широкий діапазон форм сигналів. Важлива риса, що водночас прилад визначає температуру та вологість – це саме ті параметри, від яких дуже залежать характеристики напівпровідників.

Для зняття характеристик електронних приладів використовується цифровий USB осцилограф OSCIL (рис. 2). Вихід пристрою підключається до USB осцилографа OSCIL з ноутбуком. На екрані ноутбука, при цьому, будується характеристика пристрою (спектр сигналу) та вимірюються його параметри. Модуль має можливість визначати сигнали від 1 Гц до 100 кГц.

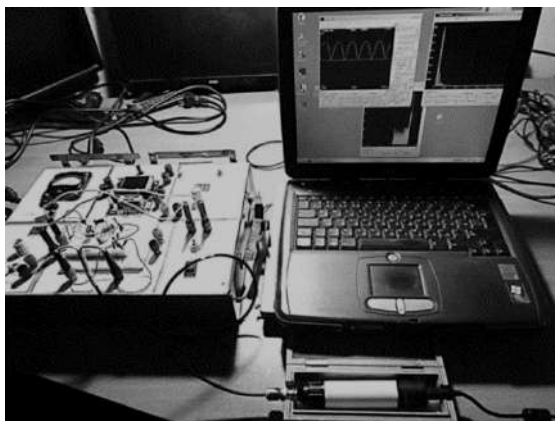


Рис. 2. Підключення цифрового USB осцилографа OSCIL з ноутбуком для дослідження характеристик електронних приладів, пристроїв та систем
Джерело: розроблено авторами.

Результати досліджень у вигляді графіків, таблиць та інших форм зберігаються в базі даних результатів досліджень. Графічна частина може відстежуватися в реальному часі при виконанні налаштувань. За необхідністю оформлюється протокол досліджень. Такий підхід дуже важливий при проведенні безперервних досліджень в умовах вимірювань в реальному часі. Налагодження електронних схем спрощується за допомогою можливості використання водночас і управління вхідними сигналами генератора з

візуальним стеженням за їх формою і параметрами та безпосередньо за формою і параметрами вихідного сигналу. Крім того, установка дозволяє проводити фізичні вимірювання параметрів та характеристик моделей електронних пристроїв та систем, що є результатом моделювання за допомогою програмного забезпечення, наприклад, на базі програми схмотехнічного моделювання «MULTISIM».

Отже, пропонується модель «Універсальна лабораторна установка дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем» може застосовуватися при підготовці спеціалістів з електроніки в закладах вищої освіти, а також при проведенні досліджень та випробувань в галузі електроніки.

Висновки. Розроблена компактна універсальна лабораторна установка дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем, замість використання декількох вимірювальних приладів, дозволяє більш якісно виконувати дослідження, випробування та діагностику електронних приладів, пристроїв та систем. Її можливості розширені завдяки введенню сучасних приладів на мікроконтролерах та забезпеченню можливості роботи установки з комп'ютерним та програмним забезпеченням. Суттєвою ознакою універсальної установки дослідження параметрів та характеристик електронних приладів, пристроїв та систем є наявність конструктивних елементів зв'язку між ними, можливість комплексного дослідження з накопиченням інформації в комп'ютері та її обробці. Параметри та характеристики елементів установки дозволяють інтегрувати їх зв'язок за допомогою інтерфейсу, що використовується (USB), а процес дослідження параметрів і характеристик електронних приладів, пристроїв та систем вдосконалюється за рахунок використання необхідного програмного забезпечення. Ергономічне рішення з їх взаємного розташування в переносному комплексі. Установка може ефективно застосовуватися при підготовці спеціалістів з електроніки в закладах вищої освіти, а також при проведенні досліджень та випробувань у галузі електроніки.

Список використаних джерел

1. Любимов, А. Я. Електроніка : навч. посіб. / А. Я. Любимов, В. О. Кудряшов, О. В. Грабовський. – Одеса : ТОВ «Плутон», 2015. – 413 с.
2. Медведенко, Б. І. Основи електроніки на базі програми схмотехнічного моделювання «MULTISIM» : навч. посіб. / Б. І. Медведенко, Л. В. Коломієць, В. П. Квасніков – Одеса : Бондаренко М. О., 2015. – 370 с.
3. Гонтаренко Г. М. Основи цифрової та мікропроцесорної техніки / Г. М. Гонтаренко. – Одеса : «ТЄС», 2016. – 281 с.
4. Дима Я. Ю. Проведення лабораторних робіт з фізики із застосуванням інтерактивних методик та комп'ютерної техніки / Я. Ю. Дима, О. П. Руденко, О. В. Саєнко // Збірник наукових праць Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини. – Ч. 2. – Умань : ПП Жовтий О. О., 2019. – С. 99-106.
5. Model of transverse-transverse type piezoelectric transformer / V. Medvid, I. Belyakova, V. Pisсiо, S. Lupenko // Scientific Journal of TNTU. – 2021. – Vol 102; No 2. – P. 96-109.
6. Тичук, Р. Б. Інструкція до експлуатації ЕК-1.0. Методичні рекомендації щодо використання «Електронного комплексу для дослідження електромагнітних коливань» в навчальному процесі / Р. Б. Тичук. – Вінниця : Модус, 2017. – 34 с.
7. Болюх, В. Ф. Електроніка та мікропроцесорна техніка : лаб. практикум з електротехніки / В. Ф. Болюх, В. С. Марков : в 3-х ч. – Ч. III. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – 76 с.
8. Ємець О. П. Розробка лабораторної установки для дослідження напівпровідникового діоду. [Електронний ресурс] / О. П. Ємець, Ю. П. Олексюк // International scientific e-journal ЛОГОС. Online. – 2019. – № 4. – С. 34-42. – Режим доступу: <https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.04.36.html>.
9. Осичев, О. В. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Діалогова взаємодія з мікропроцесорною лабораторією КР580 ІК80 / О. В. Осичев. – Харків : ХДПУ, 2019. – 47 с.

References

1. Liubymov, A.Ya., Kudriashov, V.O., Hrabovskyi, O.V. (2015). *Elektronika [Electronics]*. TOV «Pluton».
2. Medvedenko, B.I. (2015). *Osnovy elektroniky na bazi prohramy skhemotekhnichnoho modelivannia «MULTISIM» [Fundamentals of electronics based on the circuit modeling program «MULTISIM»]*. Bondarenko M. O.
3. Hontarenko, H.M. (2016). *Osnovy tsyfrovoy ta mikroprotsesornoi tekhniky [Basics of digital and microprocessor technology]*. TIeS.
4. Dyma, Ya.Yu. (2019). Provedennia laboratornykh robot z fizyky iz zastosuvanniam interaktyvnykh metodyk ta kompiuternoi tekhniky [Conducting laboratory work in physics with the use of interactive methods and computer technology]. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho derzhavnogo pedagogichnoho universytetu imeni Pavla Tychyny – Collection of scientific works of Uman State Pedagogical University named after Pavel Tychyna*, 2, 99-106.
5. Medvid, V., Belyakova, I., Piscio, V., & Lupenko, S. (2021). Model of transverse-transverse type piezoelectric transformer. *Scientific Journal of TNTU*, 102(2), 96-109.
6. Tychuk, R.B. (2017). *Instruktsiia do ekspluatatsii EK-1.0. Metodichni rekomendatsii shchodo vykorystannia «Elektronnoho kompleksu dlia doslidzhennia elektromahnitnykh kolyvan» v navchalnomu protsesi [Instructions for use EK-1.0. Methodical recommendations regarding the use of the «Electronic complex for the study of electromagnetic oscillations» in the educational process]*. Modus.
7. Boliukh, V.F., Markov, V.S. (2018). *Elektronika ta mikroprotsesorna tekhnika: lab. praktykum z elektrotekhniky [Electronics and microprocessor technology: lab. practicum in electrical engineering]*. (Vol. 3). NTU «KhPI».
8. Yemets, O.P., Oleksiuk, Yu.P. (2019). Rozrobka laboratornoi ustanovky dlia doslidzhennia napivprovodnykovoho diodu [Development of laboratory equipment for semiconductor diode research]. *International scientific e-journal АОНОΣ – International scientific e-journal АΟНОΣ*, 4, 34-42. <https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.04.36.html>.
9. Osychev, O.V. (2019). *Metodychni vkazivky do laboratornoi roboty «Dialogova vzaємodiia z mikroprotsesornoi laboratoriiiu KR580 YK80 [Methodical instructions for laboratory work «Dialogic interaction with microprocessor laboratory KR580 IK80]*. KhDPU.

Отримано 25.01.2024

UDC 621.317.2

**Volodymyr Kudryashov¹, Anatoly Lyubimov²,
Oleg Leshchenko³, Svitlana Dobrovolska⁴, Olga Kyselyova⁵**

¹senior lecturer of the Department of Electronics, Transport Technologies and Logistics
State University of Intellectual Technologies and Communications (Odesa, Ukraine)
E-mail: 067k9670511@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7457-0255>

²senior lecturer of the Department of Electronics, Transport Technologies and Logistics
State University of Intellectual Technologies and Communications (Odesa, Ukraine)
E-mail: anatoliylubimov@ukr.net

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electronics, Transport Technologies and Logistics
State University of Intellectual Technologies and Communication (Odesa, Ukraine)
E-mail: olegleshchenko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8529-8296>

⁴senior lecturer of the Department of Electronics, Transport Technologies and Logistics
State University of Intellectual Technologies and Communication (Odesa, Ukraine)
E-mail: dobrsv1@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6897-9022>

⁵Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronics, Transport
Technologies and Logistics, State University of Intellectual Technologies and Communications (Odesa, Ukraine)
E-mail: kiselovao@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9031-8781>

A MODEL OF A UNIVERSAL LABORATORY INSTALLATION RESEARCH OF PARAMETERS OF ELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

Urgency of the research. At the current stage of development of science, technology and information technologies, electronic devices, devices and systems are the basis of automation of technological processes of production and are effectively used in all its spheres. On the basis of integrated technologies, devices for automation of production, individual nodes and processes, measuring equipment, analog-digital and digital-analog converters, etc. are created.

Target setting. There was a need to create an installation that would ensure the integration of the possibilities of virtual and physical research of the parameters and characteristics of electronic devices, devices and systems in laboratory conditions, with the possibility of conducting research and analyzing their results both physically and virtually.

The research objective: to reveal the characteristics, purpose and principle of operation of the developed model of a universal laboratory installation for the study of parameters and characteristics of electronic devices, devices and systems, ensuring the possibility of operation of the installation with computer and software.

The statement of basic material. The article describes the characteristics, purpose and principle of operation of the developed model of a universal laboratory installation for the study of parameters and characteristics of electronic devices, devices and systems, with the provision of the possibility of operation of the installation with computer and software. The installation can successfully replace several measuring devices, which allows for better quality research. Its elements allow integrating their communication using an interface and optimize the research process by using the necessary software; physical measurements of parameters and characteristics of models of electronic devices and systems are carried out with the help of software, for example, based on the circuit modeling program «MULTISIM».

Conclusions. The installation can be effectively used in the training of electronics specialists in institutions of higher education, as well as in conducting research and tests in the field of electronics.

Key words: *electronic devices; electronic devices; systems; model of a universal laboratory installation; software; re-search; testing; diagnostics.*

Fig.: 2. References: 9.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-1(35)-292-301

УДК 631.58

Віталій Зацерковний¹, Віктор Ворох²

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. **Scopus ID:** 57200165109

²аспірант кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: fainkucha@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>

ДИФЕРЕНЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

Однією з актуальних задач сучасного аграрного виробництва є проблема подальшого розвитку сільськогосподарського виробництва на інноваційній платформі. Однією з технологій, яка може забезпечити високу рентабельність аграрного виробництва є система прецизійного землеробства.

Метою дослідження є технології прецизійного землеробства взагалі, а змінної норми висіву (Variable Rate Seeding, VRS) зокрема, які дозволяють правильно й точно регулювати норму висіву сільськогосподарських культур, внесення добрив, засобів захисту рослин (ЗЗВ), зрошення відповідно до властивостей ґрунту, рельєфу, метеорологічних умов та ряду інших факторів. Це дозволяє оптимізувати використання ресурсів сільськогосподарських підприємств для кожної ділянки поля і покращити продуктивність рослин на підставі даних про структуру ґрунту, рН, поживних елементів та карт врожайності.

Ключові слова: прецизійне землеробство; геоінформаційні технології; дистанційне зондування Землі; висів; карти завдання.

Рис.: 13. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Для підвищення конкурентоспроможності агропромислового комплексу (АПК) України потребує впровадження інноваційних технологій. Широке впровадження цих технологій в усіх сферах діяльності сільськогосподарських підприємств уможливує зростання продуктивності праці, економії різних видів ресурсів, сприяє скороченню витрат і зниженню собівартості аграрно-продовольчої продукції, нарощуванню обсягів та підвищенню ефективності виробництва як для потреб продовольчої безпеки України, так і для зростання експорту.

Необхідність забезпечення продовольчої безпеки шляхом інтенсифікації сільського господарства, що має місце як у світі, так і в Україні, спричинює низку проблем, перед усім раціонального використання природних ресурсів, екологічного забруднення навколишнього природного середовища (НПС), глобального потепління, зростання цін на вичерпане паливо тощо. Це спонукає сільгоспвиробників шукати шляхи інноваційних технологій підвищення ефективності вирощування сільськогосподарських культур, їх врожайності, забезпечення якості та екологічної безпеки виробництва продукції рослинництва, зменшення витрат за рахунок раціонального використання техніки.

Однією з таких технологій є технології прецизійного землеробства (прецизійного сільського господарства, прецизійного зрошення, прецизійного підходу, цифрового господарства, сільського господарства 4,0), під якими розуміють комплекс технологій, інтегруючих у собі датчики (сенсори), інформаційні системи і технології управління, ефективні сільськогосподарські машини та обладнання.

Постановка проблеми. Однією з актуальних проблем сьогодення є проблема модернізації аграрного виробництва. Перехід на диференційні технології прецизійного землекористування є новаторським підходом у землекористуванні, в основі якого лежить управління продуктивністю посівів, що враховує просторово-часову варіабельність середовища існування рослин. Саме в межах парадигми прецизійного землеробства з'яв-

ляється можливість здійснення глибокої інтеграції останніх досягнень у сфері інформаційних і геоінформаційних технологій, дистанційного зондування Землі, штучного аналізу та великих масивів даних у рослинництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний вклад в аналіз розвитку АПК України внесли вчені Л. Молдован, Л. Новаковський, Б. Пасхавер, П. Саблук, А. Третяк, О. В. Шубравська та інші. Проблема впровадження технологій прецизійного землеробства присвячені праці Л. Аніскевича, Д. Войтюка, В. Гарама, М. Макаренко, О. Ткаченка, М. Циганенка. Проте, визнаючи наукову і практичну цінність розробок названих авторів, треба відзначити, що проблема застосування технологій прецизійного землеробства в системі сучасного рослинництва ще далека від вирішення і потребує наукових досліджень.

Метою статті є аналіз, узагальнення та оцінка підходів щодо впровадження прецизійного землеробства за допомогою технологій ГІС та ДЗЗ.

Вклад основного матеріалу. Сільське господарство в Україні – одна з ключових галузей економіки, яка забезпечує населення продовольством та слугує джерелом сировини для багатьох галузей промисловості. Україна має доволі потужний потенціал земельних ресурсів, проте ефективність їх використання характеризується досить низьким рівнем. За словами директора Національного наукового центру «Інститут землеробства НААН» В. Камінського, із 60,3 млн га земель 71 % (41,8 млн га) становлять сільськогосподарські угіддя, що налічують 33,19 млн га ріллі (55 %), 7,63 млн га кормових угідь, сіножатей та пасовищ (12,6 %). При цьому ефективність використання земель сільськогосподарського призначення в Україні є значно нижчою, ніж у середньому по Європі [1].

Рівень розораності земель у світі представлений на рис. 1.

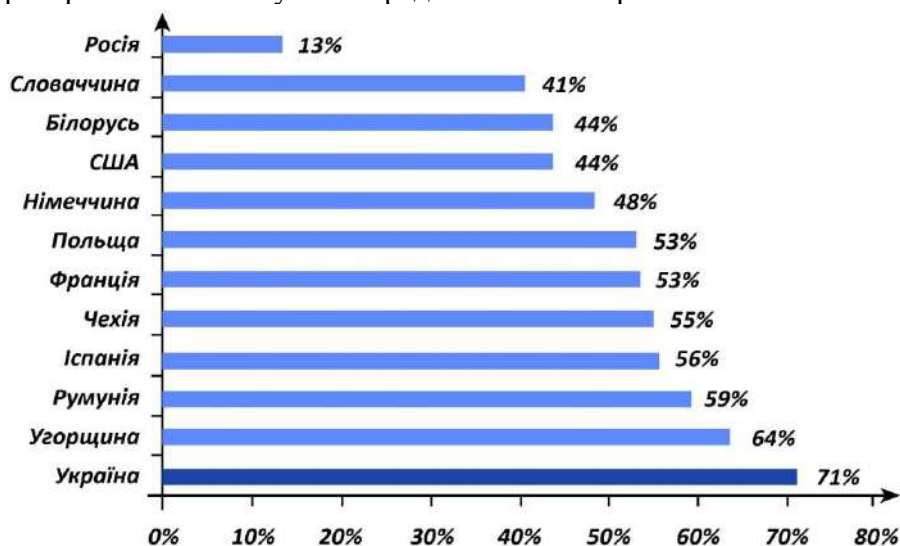


Рис. 1. Рівень розораності земель у світі [2]

Аналіз рис. 1 свідчить, що екстенсивність використання посівних площ себе не виправдує. Не виправдує також і надмірне використання трудового потенціалу.

В Україні в сільськогосподарській галузі задіяно понад 16 % населення (у середньому по розвинутих країнах, згідно з дослідженнями FAO, цей показник не перевищує 9 %), проте кількість доданої вартості, виробленої одним працівником, становить «всього» 2500 доларів США на рік, у США цей показник становить 51 000 доларів, Румунії – 9700, Польщі – 3000 [2].

За даними Світового банку Україна має один із найнижчих показників внесення добрив і використання тракторів на одиницю посівної площі (рис. 2), середня урожайність залежно від культури вдвічі-тричі відстає від світових аналогів (рис. 3), кожна посівна і збиральна кампанія пов'язані з дефіцитом паливно-мастильних матеріалів (ПММ), виробництво яких в Україні є недостатнім через дефіцит сировини й загальне зношення обладнання.

Негативні та кризові тенденції в аграрному секторі України за даними [4] представлені на рис. 4.



Рис. 2. Кількість тракторів (одиниць/1000 га) та внесення добрив (кг/га) в країнах світу
Джерело: [2].

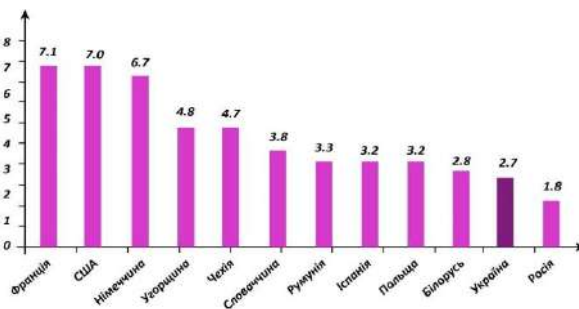


Рис. 3. Урожайність зернових (т/га) в країнах світу
Джерело: [2].

Негативні та кризові тенденції в аграрному секторі України

- Незбалансованість структури виробництва продукції аграрного сектору України (великі аграрні формування займаються виробництвом високорентабельних і швидкозростаючих сільськогосподарських культур, а трудомістке виробництво зосереджено в господарствах населення). Спеціалізація виробництва великих аграрних формувань (агрохолдингів) часто супроводжується недотриманням ними вимог раціонального землекористування, порушенням сівозмін та нехтуванням заходами щодо охорони земель сільськогосподарського призначення, що негативно впливає на екологічний стан сільськогосподарських земель.
- Низький рівень створення доданої вартості в аграрному секторі. Для України характерним є збут сировинної продукції рослинництва на світовий ринок.
- Збереження кризових явищ у тваринницькій галузі (зменшення поголів'я, зниження виробництва молока).
- Недостатній розвиток інфраструктури аграрного ринку, яка не повною мірою забезпечує виконання покладених на неї функцій щодо створення стабільних умов для забезпечення сільськогосподарських підприємств виробничими ресурсами, зберігання виробленої продукції (через відсутність овочесховищ та переробних потужностей близько 30 % вирощених овочів втрачається під час зберігання) та її реалізації.
- Виснаження ґрунтів, погіршення екології агротериторій (близько 1,7 млн га сільськогосподарських земель уражені вітровою ерозією, 13,3 млн га – водною, щорічно змивається понад 500 млн т ґрунту, з яким втрачається 24 млн т гумусу, 10 млн т калію, 1 млн т азоту, 700 тис. т фосфору). При цьому з урожаєм сільськогосподарських культур з ґрунту виноситься значно більше поживних речовин, ніж вноситься з добривами (від'ємний баланс досягає 100 кг /га).
- Висока залежність сільськогосподарського виробництва від імпорту основних видів матеріально-технічних ресурсів. Сільськогосподарська техніка в Україні майже на 70 % має імпортне походження, а зернозбиральні комбайни – практично всі імпортні. Частка рослин імпортної селекції на українському ринку в цілому оцінюється в 47 %, при цьому: ріпаку – 82,2 %, соняшнику – 79 %, цукрових буряків – 53,8 %, кукурудзи – 34,9 %.
- Неефективна державна політика підтримки експортерів.
- Слабка адаптованість сільського господарства в Україні до глобальних змін клімату.
- Відсутність програмного документа щодо розвитку аграрного сектору.

Рис. 4. Негативні та кризові тенденції в аграрному секторі України
Джерело: розроблено авторами.

Одним зі шляхів досягнення цього результату може стати концепція прецизійного землекористування.

У науковій літературі зустрічаються багато термінів і визначень, які або є синонімами, або позначають основні елементи прецизійного землеробства. Наприклад, в англійській мові крім терміну «Precision Agriculture», що означає прецизійне сільське господарство вживається терміни «Precision Farming» – прецизійне землеробство, «Site-specific Farming» – індивідуальне землеробство, «Site-specific crop management» – управління посівами з урахуванням особливостей ділянки, «Spatially-variable crop production» – просторово-змінне рослинництво, «Grid Farming» – грид-фермерство, «Management of variability» – керування мінливістю. Крім того, термінологія прецизійного землеробства поширилась на прецизійне тваринництво (Precision Livestock Farming) і його галузі – прецизійне молочне тваринництво (Precision Dairy Farming), прецизійне свинарство (Precision Pork Farming) та прецизійне птахівництво (Precision Poultry Farming).

Система прецизійного землеробства дозволяє підвищити ефективність і точність всіх сільськогосподарських операцій: обробки ґрунту, посіву, обприскування, внесення добрив і збирання врожаю. Впровадження такої системи потребує нового мислення, підготовки кваліфікованих кадрів, забезпечення підприємств сучасною інформаційно-комунікативною та обчислювальною технікою, наявністю методів математичного моделювання, засобів автоматизації, нових інформаційних технологій, перед усім геоінформаційних та засобів штучного інтелекту.

Об'єктом прецизійного землеробства виступає не поле загалом, а кожна його окрема частина (ділянка) зі своїми характеристиками (рельєфу, родючості, рослинного складу, кислотності, кількістю рухомого азоту, калію, магнію, фосфору, вологості тощо). Змінні норми внесення засобів захисту рослин, мінеральних і органічних добрив, полив необхідно регулювати відповідно до топографічного профілю поля, де враховується висота, нахил та аспект, щоб забезпечити максимальний врожай з мінімальними втратами ресурсів. На підставі зібраних і опрацьованих даних на всіх ділянках поля визначають і обґрунтовують агротехнічні способи вирощування конкретних сільськогосподарських культур.

Визначити характеристики родючості ґрунту неможливо без аналізу проб за показниками величини рН, загального вмісту гумусу, валового та рухомих сполук фосфору, калію, азоту тощо. Зібрані дані разом з даними про локальні особливості ґрунту і кліматичні умови регіону використовуються для планування висіву, розрахунку внесення добрив, засобів захисту рослин тощо. Де факто – це оптимальне управління землеробством для кожного квадратного метра поля.

Наприклад, якщо на окремій ділянці поля площею 25 га відмічена невелика ділянка площею 0,5 га із недостатньою кількістю поживних елементів, то недоцільно вносити добрива і вводити додаткові сеанси поливу для всього поля – просто потрібно обробити проблемну ділянку. Це дасть економію добрив та ПММ, зменшить зарплату і амортизацію техніки, заощадить час техніки і її екіпажу для виконання інших робіт.

Прецизійне землеробство за рахунок використання передових цифрових технологій мінімізує витрати, робочу силу та час, максимізує продуктивність і прибутковість виробництва сільськогосподарської продукції, зменшує вплив на НПС. Завдяки сучасним технологіям можна здійснювати з високою точністю правильне втручання в потрібному місці, у потрібний час, відповідаючи на специфічні вимоги окремих культур і окремі ділянки поля.

Наведене свідчить про гостру потребу у впровадженні в аграрну сферу України прецизійного землеробства. Додаткового ефекту можна досягти шляхом впровадження суміжних додаткових (суміжних) технологій підвищення ефективності сучасного землеробства, представлених на рис. 5.

Інтеграція перерахованих технологій у господарську діяльність сільськогосподарських підприємств забезпечує:

– високу продуктивність та врожайність виробництва (точне знання коли й де використовувати зрошення, добрива та гербіциди, веде до підвищення врожайності);

– покращене управління витратами (точні дані забезпечують кращий контроль над витратами. Використовуючи найсучасніші інструменти та автоматизовані системи управління, компанії можуть контролювати та коригувати посіви, скорочувати витрати на виробництво, детально аналізуючи кількість ресурсів (таких як зрошення, добрива та пестициди), необхідних на кожній ділянці господарства;

– зниження відходів (цифрові технології скорочують використання води, палива, добрив і гербіцидів, сприяють підвищенню врожайності та зменшують витрати ресурсів, часу та праці);

– зменшення вуглецевого сліду (використання новітніх технологій зменшує вуглецевий слід. Ефективність, досягнута в автономній роботі та обладнанні, також зменшує кількість викопного палива для живлення цих елементів).

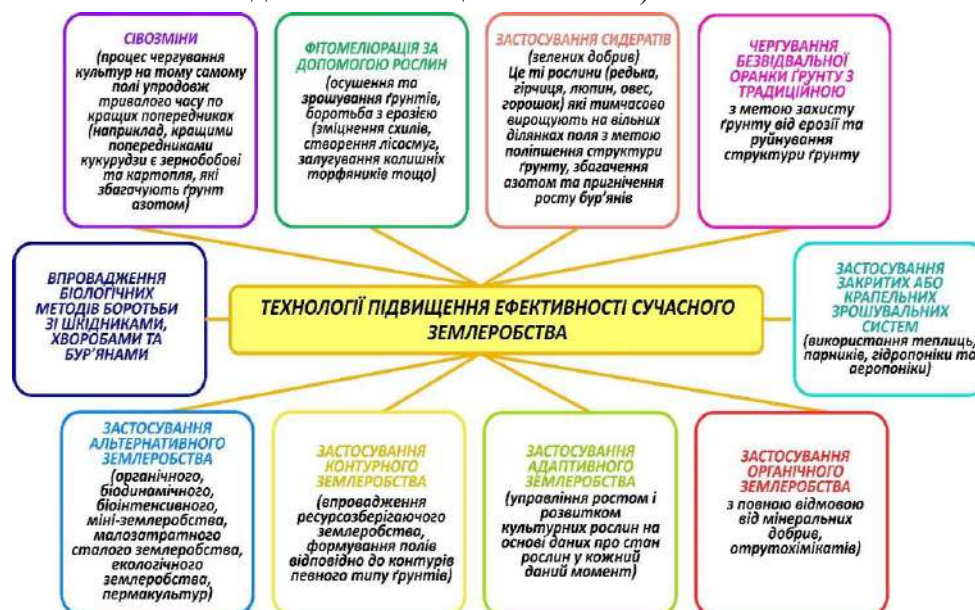


Рис. 5. Додаткові технології підвищення ефективності сучасного землеробства

Джерело: розроблено авторами.

Комплекс технологій, що використовуються в прецизійному землеробстві представлена на рис. 6.

Застосування цих технологій дає змогу прийняття управлінських рішень спрямованих на раціональне економічно обґрунтоване застосування насіння, добрив, засобів захисту рослин (ЗЗР); підвищення ефективності роботи сільськогосподарської техніки; якості продукції; захисту навколишнього середовища з урахуванням просторової і часової мінливості параметрів родючості ґрунту, стану рослин, природно-кліматичних умов з урахуванням внутрішньопольової неоднорідності (у необхідній кількості й тільки в потрібному місці).

Впровадження прецизійного землеробства стало можливим за рахунок інтеграції технологій геоінформаційних систем (ГІС), дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та глобального позиціонування (GPS). Ці технології дають можливість порівнювати дані в реальному масштабі часу з точною координатною інформацією, використовувати великі об'єми просторових даних.

При цьому можливе як використання всього комплексу технологій, так і окремих його складових.

Одним із ключових елементів впровадження технологій прецизійного землеробства є диференційований підхід до проведення усіх сільськогосподарських операцій на полі.

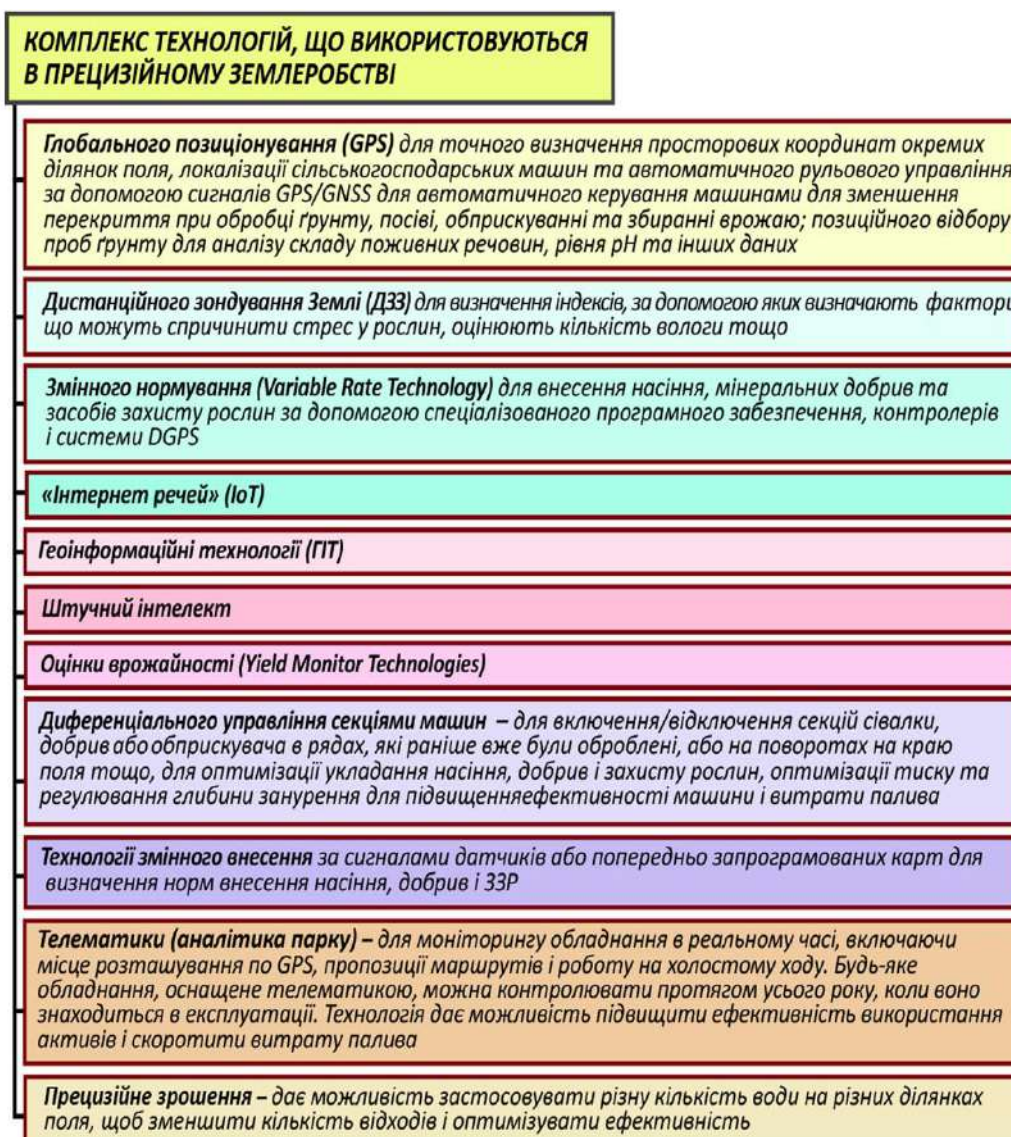


Рис. 6. Комплекс технологій, що використовуються в прецизійному землеробстві
Джерело: розроблено авторами.

Впровадження точного землеробства в практику сільськогосподарського виробництва пов'язано з одержанням детальних даних про конкретне поле, оскільки просторова мінливість агрохімічних властивостей навіть в межах одного поля обумовлює неоднакову забезпеченість сільськогосподарських рослин поживними елементами. При незначній мінливості цього фактору в межах інтервалу толерантності, вплив на урожайність буде незначним, але у випадку сильних коливань агрохімічних властивостей на полі, вплив на урожайність буде значною.

Врахування особливостей кожної ділянки поля – рельєфу, агрохімічного складу та типу ґрунтів, факту врожайності та інших нюансів дозволяє сформувати план кожної операції у вигляді карти-завдання для сільськогосподарської техніки [9].

Для розуміння того, що відбувається на полі (тип ґрунту, вміст макро- та мікроелементів, органіки, зволоженості тощо), яких добрив потребує поле потрібно попередньо формувати стратегію роботи у вигляді створення карт-завдань техніки (розкидача, обприскувача або аплікатора для внесення добрив.

Під картою-завданням розуміють картографічне зображення, що містить дані про норми внесення або висіву, за допомогою яких контролери, що встановлені на МТА за допомогою навігаційного забезпечення застосовують відповідну норму до певного місця поля, регулювати цю норму залежно від характеристик ділянки в режимі офлайн.

Основні джерела даних для створення карт-завдань представлені на рис. 7.



Рис. 7. Основні джерела даних для створення карт-завдань [9]

При цьому реалізується економія паливно-мастильних матеріалів (ПММ), витрат посівного матеріалу, добрив, засобів захисту рослин (ЗЗР), води, більш ефективно використовується машинно-тракторний парк підприємства, пом’якшується вплив сільського господарства на навколишнє природне середовище.

Приклад карти-завдання для посіву представлений на рис. 8.



Рис. 8. Приклад карти-завдання

Джерело: розроблено авторами.

Кількість стовпців припису може бути різною (їх кількість та назву задає користувач). Для кожної зони також можна вибрати більш високі або більш низькі норми висіву, декілька різних типів гібридів, одночасне внесення добрив тощо. Для створення таких карт нині існує безліч додатків, проте найпопулярнішими є FieldView від Climate, Farm Works від Trimble, SMS від AG Leader, інші GIS програми типу QGIS [10].

Агрохімічне обстеження полів в Чернігівській області 2019 р., що було здійснено на полях агропромхолдингу Астарта-Київ представлено на рис. 9.

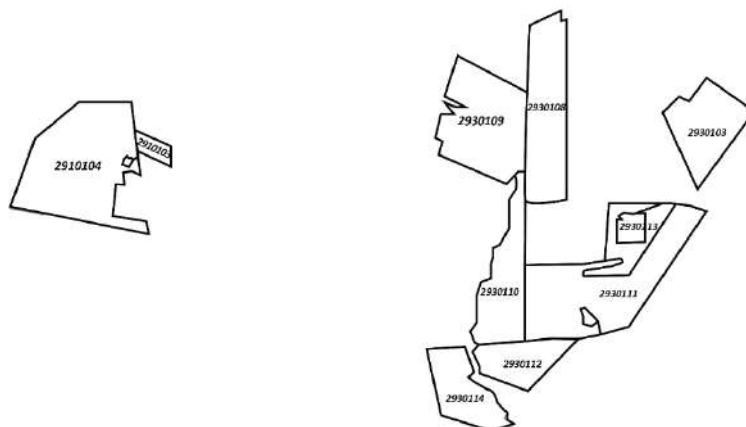


Рис. 9. Схема полів Чернігівської області, на яких відбувалось агрохімічне обстеження 2019 р.

Джерело: розроблено авторами.

Картограма кислотності, що представлені на рис. 10, вмісту рухомого фосфору на рис. 11 обмінного калію на рис. 12, картограма гумусу на рис. 13., використовуються для розрахунку доз меліорантів і добрив.



Рис. 10. Карта кислотності полів
Джерело: розроблено авторами.

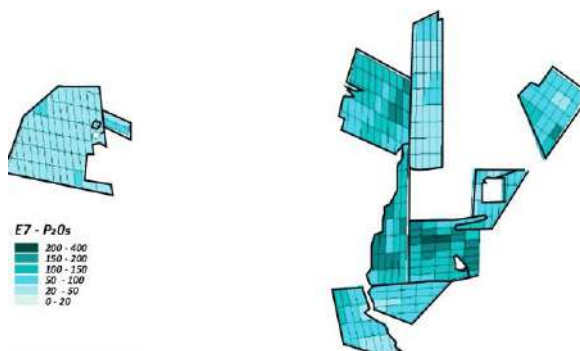


Рис. 11. Карта рухомого фосфору
Джерело: розроблено авторами.

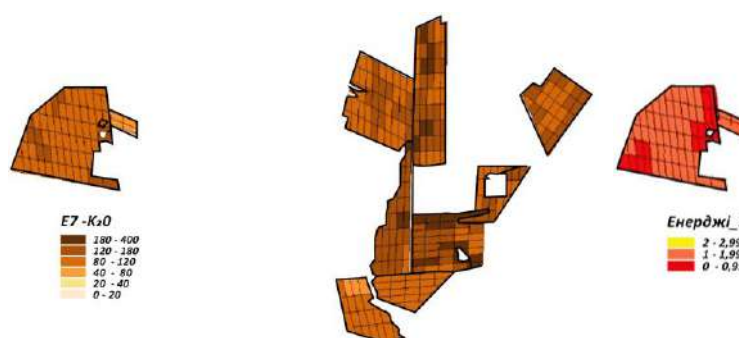


Рис. 12. Карта обмінного калію
Джерело: розроблено авторами.

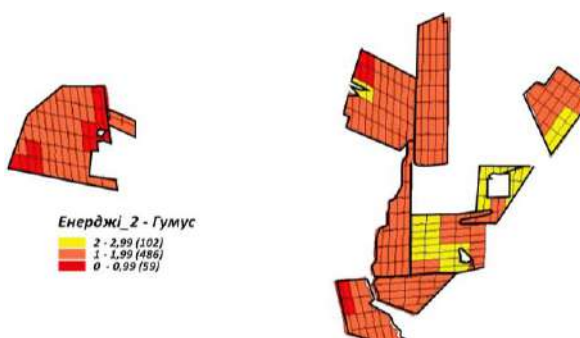


Рис. 13. Карта гумусу
Джерело: розроблено авторами.

Проведенні агрохімічні обстеження слугують основою для подальшого диференційного внесення добрив та насіння.

Висновки. Застосування технологій прецизійного землеробства дозволяє істотно підвищити врожайність культур та значно зекономити ресурси.

Шляхом оверлея створених електронних карт-шарів можна отримати електронну карту агроекологічних груп і видів земель, де кожен контур буде містити атрибутивну інформацію по агроекологічних параметрах земель.

Дана карта може слугувати основою для впровадження технологій прецизійного землеробства та проектування адаптивно-ландшафтних систем землеробства й агротехнологій стосовно до різних агроекологічних груп земель. Цей процес починається зі створення карт придатності земель під культури, затребувані на ринку. Для цього екологічні вимоги культур порівнюються з агроекологічними параметрами земель по кожному виду (контур карти агроекологічних груп і видів земель). Зазвичай придатність встановлюється по 6 категоріях.

Надалі, шляхом оверлея отриманих карт, формують поля сівозмін, які виділяються в межах агроекологічних типів земель, і ділянки на цих полях, які відрізняються певними агроекологічними параметрами і вимагають спеціальних заходів.

Подальше проектування передбачає розробку систем сівозмін, зміни пасовищ, систем обробки ґрунту, внесення добрив ЗЗР застосування МТА, розробки пакетів агротехнологій для різних рівнів інтенсифікації (екстенсивні, нормальні, інтенсивні, точні), розробки електронної книги історії полів.

Наведені міркування свідчать про необхідність створення аграрних ГІС.

Отримані наукові результати безпосередньо свідчать про досягнення мети і вирішення поставлених завдань статті.

Список використаних джерел

1. За рівнем розораності земель Україна займає перше місце у світі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://superagronom.com/news/5127-za-rivnem-rozoranosti-zemel-ukrayina-zaymae-pershe-mistse-v-sviti>.
2. Тимошенко, Є. Точне землеробство та українські реалії [Електронний ресурс] / Є. Тимошенко [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://agro-business.com.ua/agro/ekspertnadumka/item/8155-tochne-zemlerobstvo-ta-ukrainski-realii.html>.
3. Аніскевич, Л. В. Система точного землеробства : матеріали для самост. роботи / Л. В. Аніскевич. – Київ, 2021. – 235 с.
4. Антикризова політика в реальному секторі економіки України: пріоритетні напрями і завдання: аналіт. доп. / [Собкевич О. В., Шевченко А. В., Русан В. М. та ін.]; за наук. ред. Я. А. Жаліла. – Київ : НІСД, 2022. – 72 с. DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.07>.
5. Технологии по адаптации к изменению климата. Сельскохозяйственный сектор / Р. Клементс, Дж. Хэггэр, А. Кезада, Дж. Торрес. – Нью-Дели : Центр ЮНЕП в Рисо, 2011. – 298 с.
6. Пілічева, М. О. Сучасні технології землеустрою та кадастру : конспект лекцій для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій) / М. О. Пілічева ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 107 с.
7. Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року : постанова Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 р. № 179. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-a1>
8. Циганенко, М. Система точного землеробства економить ваші гроші / М. Циганенко, М. Макаренко // Пропозиція. – 2017. – № 2 – С. 56-60.
9. Створення карт-завдань [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.smartfarming.ua/services/stvorennia-kart-zavdan>.
10. Шевченко, К. Школа агрономів: що треба знати про змінні норми [Електронний ресурс] / К. Шевченко. – Режим доступу: <https://agravery.com/uk/posts/show/skola-agronomiv-so-treba-znati-pro-zminni-normi>.

References

1. SuperAgronom. (2018, September 10). *Za rivnem rozoranosti zemel Ukraina zaimaie pershe mistse u sviti [Ukraine ranks first in the world in terms of ploughed land]*. <https://superagronom.com/news/5127-za-rivnem-rozoranosti-zemel-ukrayina-zaymae-pershe-mistse-v-sviti>.
2. Tymoshenko, Ye. (2012, November 16). *Tochne zemlerobstvo ta ukrainski realii [Precision farming and Ukrainian realities]*. *Ahrobiznes Sohodni*. <https://agro-business.com.ua/agro/ekspertnadumka/item/8155-tochne-zemlerobstvo-ta-ukrainski-realii.html>.
3. Aniskevych, L. (2021). *Systema tochnoho zemlerobstva: materialy dlia samost. roboty [Precision farming system. Materials for self-study]*.
4. Sobkevych, O., Shevchenko, A., & Rusan, V. (2022). *Antykryzova polityka v realnomu sektori ekonomiky Ukrainy: priorytetni napriamy i zavdannia: analit. dop. [Anti-crisis policy in the real sector of the economy of Ukraine: priority directions and tasks]*. NISS. <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.07>.
5. Clements, R., Hagggar, J., Quezada, A., & Torres, J. Zhu, X. (Eds.). (2011). *Tekhnologii po adaptatsii k izmeneniiu klimata. Selskokhoziaistvennyi sektor [Climate change adaptation technologies – Agriculture sector]*. UNEP Risø Centre.
6. Pilicheva, M. (2022). *Suchasni tekhnolohii zemleustroiui ta kadastru : konspekt leksii dlia zdobuvachiv tretoho (osvitno-naukovoho) rivnia vyshchoi osvity spetsialnosti 193 – Heodeziia ta zemleustrii [Modern technologies of land management and cadastre: lecture notes for applicants for the third (educational and scientific) level of higher education major 193 – Geodesy and land management]*. Beketov National University of Urban Economy.
7. *Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 roku [On approval of the National Economic Strategy for the period up to 2030]*, Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 179 (2021, March 3). <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-a1>.
8. Tsyhanenko, M., & Makarenko, M. (2017). *Systema tochnoho zemlerobstva ekonomyt vashi hroshi [Precision farming system saves your money]*. *Propozytsiia – Offer*, 2, 56-60.

9. Stvorennia kart-zavdan [Smart Farming]. (n.d.). Creation of task maps. <https://www.smartfarming.ua/services/stvorennia-kart-zavdan/>.

10. Shevchenko, K. (2019, February 8). Shkola ahronomiv: shcho treba znaty pro zminni normy [School of agronomists: what you need to know about variable rates]. *Agravery*. <https://agravery.com/uk/posts/show/skola-agronomiv-so-treba-znati-pro-zminni-normi>.

Отримано 27.02.2024

UDC 631.58

Vitaly Zatserkovny¹, Viktor Vorokh²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko Kyiv National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. Scopus ID: [57200165109](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57200165109)

²Graduate Student of the Department of Geoinformatics

Taras Shevchenko Kyiv National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: fainkucha@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>

DIFFERENTIAL TECHNOLOGIES OF PRECISION AGRICULTURE

One of the urgent tasks of modern agricultural production is the problem of further development of agricultural production on an innovative platform. This will increase labor productivity, save resources, reduce costs, reduce production costs, increase production efficiency and ensure food security of Ukraine, which is one of the largest producers and exporters of wheat, corn, and barley in the world. One of such technologies that can ensure high profitability of agricultural production is the precision farming system.

The concept of precision farming is based on the spatial heterogeneity of soil characteristics (relief, soil-forming rocks, snow cover, influence of ground and rainwater, diversity of vegetation cover, the impact of wildlife and human activities, etc.) within one field followed by differential compensation of these differences within one field.

One of the key elements of the introduction of precision farming technologies is a differentiated approach to conducting all agricultural operations in the field. At the same time, savings of fuels and lubricants, consumption of seed material, fertilizers, plant protection products, water, the machine and tractor park of the enterprise is more effectively used, and the impact of agriculture on the natural environment is mitigated.

The purpose of the research is the technology of precision farming in general, and variable rate seeding (Variable Rate Seeding, VRS) in particular, which allow you to correctly and precisely regulate the rate of sowing agricultural crops, applying fertilizers, plant protection products, irrigation in accordance with the properties of the soil, relief, meteorological conditions and a number of other factors. This allows to optimize the use of agricultural resources for each section of the field and improve plant productivity based on data on soil structure, pH, nutrient elements and yield maps.

Keywords: precision farming; geoinformation technologies; remote sensing of the Earth; sowing; task maps.

Fig.: 13. References: 10.

Андрій Кравчук¹, Олександр Кравчук², Олександр Возний³

¹доктор технічних наук, професор кафедри водопостачання та водовідведення
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: kravchuk.am@knuba.edu.ua **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-8732-9244> **SCOPUS Author ID:** 57209316527

²кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання та водовідведення
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: kravchuk.oa2@knuba.edu.ua **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6578-8896> **SCOPUS Author ID:** 55639047900

³студент

Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: voznii_ot@knuba.edu.ua **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0004-4222-1335>

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ НАПІРНИХ ПОХИЛЬНИХ ЗБІРНИХ ДРЕНАЖНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА НАЯВНОСТІ ПОХИЛУ РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД

На основі аналізу системи диференційних рівнянь, які описують рух рідини в збірних дренажних трубопроводах, що прокладені і працюють за наявності певного похилу рівня ґрунтових вод, запропоновані досить прості і зручні для застосування аналітичні залежності для розрахунку основних гідравлічних і конструктивних характеристик таких труб. Досліджено, як величина геометричного похилу прокладання дренажної труби та рівень ґрунтових вод впливає на її розрахункові характеристики.

Ключові слова: збірний дренажний трубопровід; гідравлічний коефіцієнт тертя; коефіцієнт фільтрації; фільтраційний опір; геометричний похил дренажної труби; змінна витрата рідини.

Рис.: 2. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Ефективна система дренажу є ключовою для забезпечення оптимальних умов сільськогосподарського виробництва, зокрема для підвищення врожайності та підтримання стійкого вологісного режиму ґрунтів [1; 2]. Розробка надійної методики розрахунку дренажних трубопроводів меліоративних систем є на сьогодні актуальною через посилення уваги до раціонального використання земель, водних ресурсів та високого попиту на аграрну продукцію. Зміни кліматичних умов, збільшення зон ризику повеней та екстремальних кліматичних явищ підкреслюють важливість оптимізації конструкції меліоративних систем для ефективного водозабезпечення та відведення надлишкової води з сільськогосподарських земель [3; 4].

Постановка проблеми. При проектуванні збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем постає проблема їх надійного розрахунку з урахуванням різноманітних умов. Зокрема, при розрахунках слід враховувати такі параметри, як похил дренажного трубопроводу та похил рівня ґрунтових вод (РГВ), що часто має місце на практиці.

Вирішення цієї проблеми сприятиме підвищенню стійкості сільськогосподарських угідь до екстремальних погодних умов, забезпечить більш ефективне використання водних та земельних ресурсів, зробить вагомий внесок у розвиток сучасної гідротехніки та гідромеліорації, сприятиме практичному вдосконаленню конструкції меліоративних систем. Також це відповідає загальним стратегічним викликам, пов'язаним зі сталим розвитком та управлінням природними ресурсами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням роботи напірних збірних дренажних трубопроводів при різних умовах експлуатації та розробкою методики їх інженерного розрахунку займались досить багато вітчизняних та іноземних науковців [5-8]. Зокрема, вивчалися випадки роботи даних трубопроводів при рівномірному [9] та нерівномірному [10] зборі рідини вздовж шляху. Проте переважна більшість авторів у своїх роботах розглядали дренажні трубопроводи, які прокладені горизонтально, при горизонтальному РГВ. Однак на практиці доволі часто має місце похил труб та РГВ, і це необхідно враховувати при розрахунках. Окремі випадки роботи горизонтального дренажного трубопроводу, який працює при наявності похилу РГВ розглянуто нами в роботі [11], а аналіз умов експлуатації похильного дренажного трубопроводу при горизонтальному РГВ наведено в роботі [12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що випадок одночасного впливу похилу трубопроводу і РГВ на характеристики й умови роботи напірних збірних дренажних трубопроводів було досліджено не достатньо.

Метою статті є розробка методики розрахунку параметрів напірних збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем, які прокладені з похилом та працюють за наявності похилу РГВ.

Виклад основного матеріалу. Залежно від особливостей рельєфу меліоративної ділянки збірні дренажні трубопроводи можуть бути прокладені як горизонтально, так і з прямим або зворотним похилом. Під прямим похилом ($i > 0$) слід розуміти випадок, коли відмітки лотка збірного дренажного трубопроводу знижуються за довжиною від початкового до кінцевого перерізу. Під зворотним похилом ($i < 0$) слід приймати протилежний варіант, коли відмітки лотка збільшуються за довжиною труби.

Поверхня РГВ при цьому також може бути або горизонтальною ($\bar{i} = 0$), або мати прямий ($\bar{i} > 0$) чи зворотний ($\bar{i} < 0$) похил. В загальному випадку він або співпадає, або є зворотним у порівнянні з похилом труб. Вказані обставини суттєво впливають на характеристики потоку в даних трубах і обов'язково повинні враховуватись при їх проєктуванні.

Таким чином, у процесі аналізу умов проєктування та експлуатації напірних похильних збірних дренажних трубопроводів можливе виникнення таких основних варіантів:

- 1) дренажний трубопровід прокладений з прямим похилом ($i > 0$) за наявності прямого похилу РГВ ($\bar{i} > 0$);
- 2) дренажний трубопровід прокладений зі зворотним похилом ($i < 0$) за наявності прямого похилу РГВ ($\bar{i} > 0$);
- 3) дренажний трубопровід прокладений із прямим похилом ($i > 0$) за горизонтального РГВ ($\bar{i} = 0$);
- 4) дренажний трубопровід прокладений зі зворотним похилом ($i > 0$) за горизонтального РГВ ($\bar{i} = 0$);
- 5) горизонтальний дренажний трубопровід ($i = 0$) за наявності прямого похилу РГВ ($\bar{i} > 0$);
- 6) горизонтальний дренажний трубопровід ($i = 0$) за наявності зворотного похилу РГВ ($\bar{i} < 0$).

Нижче в роботі розглянуто типові, найбільш часто застосовувані на практиці, випадки роботи похильних напірних збірних дренажних трубопроводів за наявності похилу поверхні РГВ.

Розрахункова схема роботи похильного збірного дренажного трубопроводу ($i > 0$, $i < 0$) за наявності похилу поверхні РГВ ($\bar{i} > 0$), ($\bar{i} < 0$) наведена на рис. 1.

На ньому площина зрівняння проходить через вісь кінцевого перерізу збірного дренажного трубопроводу.

Рух рідини в розглядуваному випадку можна описати системою диференціальних рівнянь, яка складається з рівняння гідравліки змінної маси (1) і модифікованого рівняння фільтрації (2) [13]. Враховуючи позначення на рис. 1, ця система набуває вигляду:

$$\frac{dh_i}{dx_i} + \frac{2}{g} V_i \frac{dV_i}{dx_i} + \frac{\lambda_{зб}}{2gD_i} V_i^2 \mp (\bar{i} \mp i) = 0 \quad (1)$$

$$q_i = \frac{d(V_i \Omega_i)}{dx_i} = \frac{k_\phi (H_i - h_i - \Delta_i)}{\Phi} = k_\phi \frac{z_i}{\Phi}, \quad (2)$$

де $H_{n.i}$ – висота РГВ від площини зрівняння в початковому перерізі дренажного трубопроводу; $H_{к.і}$ – висота РГВ від площини зрівняння в кінцевому перерізі труби; H_i – висота РГВ від площини зрівняння в перерізі труби на відстані x_i від її початку; $\frac{H_{n.i} - H_{к.і}}{l_i} = \bar{I}$ – похил

поверхні РГВ; $\frac{\Delta_{n.i}}{l_i} = i$ – геометричний похил прокладання трубопроводу; l_i – довжина дренажної труби; h_i – п'єзометричний напір в трубі на відстані x_i ; $z_i = H_i - h_i - \Delta_i$ – змінний за довжиною перепад напорів, під дією якого відбувається втікання рідини з навколишнього середовища в трубопровід; Q_i , V_i , D_i , Ω_i – відповідно, витрата, середня швидкість, діаметр і площа живого перерізу потоку на відстані x_i від початку труби; $\bar{\Phi}$ – фільтраційний опір дрени; k_ϕ – коефіцієнт фільтрації ґрунту навколо труби; $\lambda_{зб}$ – гідравлічний коефіцієнт тертя дренажного трубопроводу; g – прискорення вільного падіння.

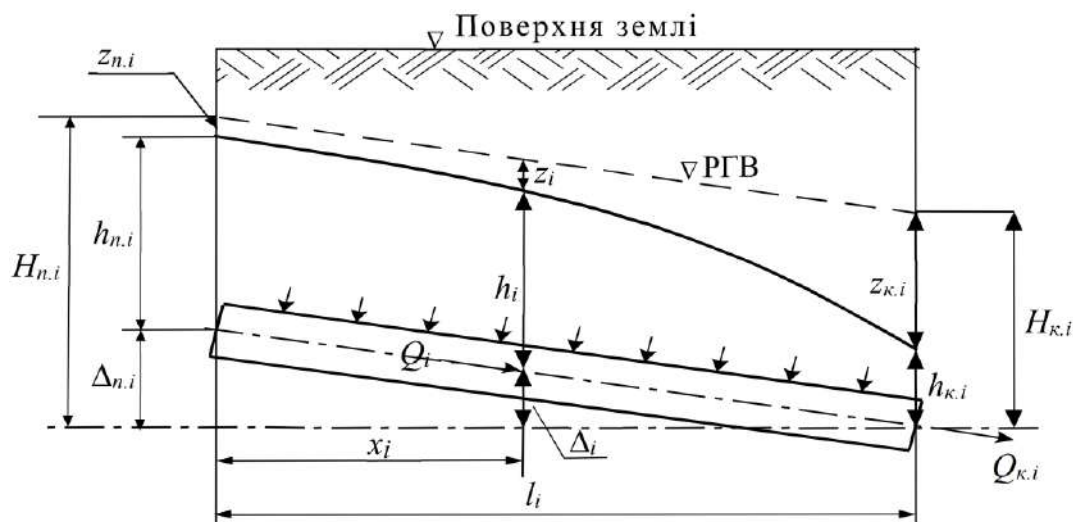


Рис. 1. Схема роботи похильного збірного дренажного трубопроводу за наявності похилу РГВ

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 1 слідує такі співвідношення: $H_i = H_{n.i} \mp \bar{I} \cdot x_i$; $\Delta_i = \Delta_{n.i} \mp i \cdot x_i$; $h_i = H_i - \Delta_i - z_i = H_{n.i} \mp \bar{I} \cdot x_i \mp \Delta_{n.i} \pm i \cdot x_i - z_i = H_{n.i} \mp (\bar{I} \mp i)x_i \mp \Delta_{n.i} - z_i$; $dh_i = \mp(\bar{I} - i)dx_i - dz_i$.

Використаємо дані співвідношення, а також введемо нові змінні:

$$\bar{V}_i = \frac{V_i}{\sqrt{g z_{к.і}}}, \quad \bar{x}_i = \frac{k_\phi x_i}{\Omega_i \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{z_{к.і}}{g}}, \quad \bar{z}_i = \frac{z_i}{z_{к.і}}, \quad dh_i = -z_{к.і} d\bar{z}_i. \quad (3)$$

Після цього вихідна система диференціальних рівнянь зводиться до безрозмірного вигляду:

$$-\frac{d\bar{z}_i}{d\bar{x}_i} + 2\bar{V}_i \frac{d\bar{V}_i}{d\bar{x}_i} + \zeta_{l_{зб}} A \bar{V}_i^2 \mp B = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{V}_i}{d\bar{x}_i} = \bar{z}_i, \quad (5)$$

де $\zeta_{l_{3\bar{b}}} = \lambda_{3\bar{b}} \frac{l_i}{D_i}$ – коефіцієнт опору збірного дренажного трубопроводу;

$A = \frac{1}{2\bar{x}_{\kappa,i}} = \frac{\Omega_i \bar{\Phi}}{2k_{\phi} l_i} \sqrt{\frac{g}{z_{\kappa,i}}}$ – узагальнений параметр збірного дренажного трубопроводу, який

враховує його конструктивні і фільтраційні характеристики; $B = \frac{2l_i A I}{z_{\kappa,i}}$ – параметр, який

враховує вплив похилу РГВ і трубопроводу на характеристики потоку в дрени; $I = \bar{I} - i$ – різниця значень похилу РГВ і дренажного трубопроводу.

У роботі [14] обґрунтовано, що другим членом рівняння (4) можна знехтувати у зв'язку з його відносно малою величиною. Після цього рівняння (4) набуде вигляду:

$$\frac{d\bar{z}_i}{d\bar{x}_i} = \zeta_{l_{3\bar{b}}} A \bar{V}_i^2 \mp B. \quad (6)$$

Після підстановки (5) в (6) і розділення змінних, отримаємо:

$$\bar{z}_i d\bar{z}_i = \zeta_{l_{3\bar{b}}} A \bar{V}_i^2 d\bar{V}_i \mp B d\bar{V}_i. \quad (7)$$

Інтегруємо вираз (7) [15]:

$$\frac{\bar{z}_i^2}{2} = \zeta_{l_{3\bar{b}}} A \frac{\bar{V}_i^3}{3} \mp B \bar{V}_i + C. \quad (8)$$

Константу інтегрування визначаємо при граничних умовах: на початку труби $\bar{V}_{n,i} = 0$; $\bar{z}_i = \bar{z}_{n,i}$, тоді $C = \frac{\bar{z}_{n,i}^2}{2}$.

Після підстановки значення C в (8), остаточно будемо мати:

$$\bar{z}_i^2 - \bar{z}_{n,i}^2 = \frac{2A\zeta_{l_{3\bar{b}}}}{3} \bar{V}_i^3 \mp 2B\bar{V}_i. \quad (9)$$

З рівняння (9) в кінцевому перерізі реальної труби отримаємо:

$$1 - \bar{z}_{n,i}^2 = \frac{2A\zeta_{l_{3\bar{b}}}}{3} \bar{V}_{\kappa,i}^3 \mp 2B\bar{V}_{\kappa,i}. \quad (10)$$

За аналогією з методикою, приведеною в [12], для подальшого аналізу введемо поняття збірного дренажного трубопроводу нескінченної довжини ($l_i \rightarrow \infty$, $\zeta_{l_{3\bar{b}}} \rightarrow \infty$). Для нього перепадом напорів в початковому перерізі можна знехтувати, тобто прийняти $\bar{z}_{n,i} \rightarrow 0$. Тоді рівняння (10) буде мати вигляд:

$$\frac{2A\zeta_{l_{3\bar{b}}}}{3} \bar{V}_{\kappa,\infty}^3 \mp 2B\bar{V}_{\kappa,\infty} = 1, \quad (11)$$

де $\sqrt[3]{\frac{3}{2A\zeta_{l_{3\bar{b}}}}} = \bar{V}_{\kappa,\infty}$ – відносна швидкість руху води в кінці нескінченно довгого горизонтального трубопроводу з такими ж самими характеристиками, як і похильного.

При $B = 0$ рівняння (11) стає залежністю, яка описує роботу збірного дренажного трубопроводу, який прокладено горизонтально та працює при горизонтальному РГВ [14].

За отриманою залежністю (кубічним рівнянням (11)) рекомендується розраховувати величину відносної швидкості в кінцевому перерізі умовного нескінченно довгого похильного трубопроводу. Для спрощення розрахунків також можна користуватись графіком, наведеним на рис. 2.

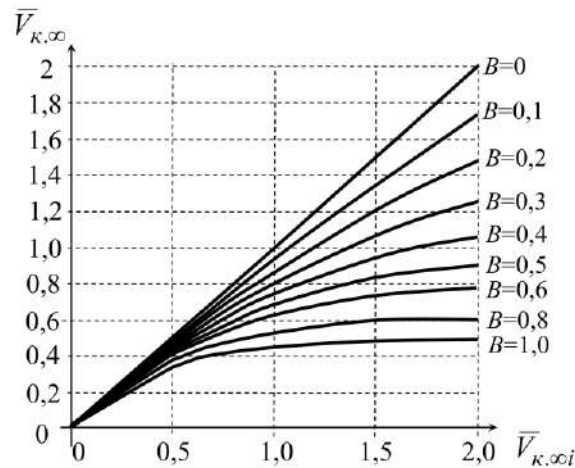


Рис. 2. Графік залежності швидкості потоку в кінці реального і фіктивного трубопроводів від величини параметра B

Джерело: розроблено авторами.

З метою подальшого аналізу введемо поняття фіктивного горизонтального ($I = 0, B = 0$) збірною дренажного трубопроводу нескінченної довжини з характеристиками, які забезпечують у його кінцевому перерізі таку ж відносну швидкість (витрату), як і у похильного дренажного трубопроводу нескінченної довжини, тобто для них справедливе співвідношення:

$$\bar{V}_{k,\infty i} = \bar{V}_{\phi,k,\infty} = \sqrt[3]{\frac{3}{2\zeta_{l_{30}} A}} \quad (12)$$

За аналогією з даними роботи [11] параметри похильних збірних дренажних трубопроводів за наявності похилу РГВ можна визначати за формулами:

- відносний перепад напорів за довжиною збірного дренажного трубопроводу

$$\bar{z}_{\infty i} = \frac{1}{\left[1 + \frac{\bar{x}_{k,\infty i} - \bar{x}_{\infty i}}{2\bar{V}_{k,\infty i}}\right]^3} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1-x/l}{4A\bar{V}_{k,\infty i}}\right)^3}; \quad (13)$$

- відносний перепад напорів на початку збірного дренажного трубопроводу ($\bar{x}_{n,\infty} = 0$)

$$\bar{z}_{n,\infty i} = \frac{1}{\left[1 + \frac{\bar{x}_{k,\infty i}}{2\bar{V}_{k,\infty i}}\right]^3} = \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{4A\bar{V}_{k,\infty i}}\right]^3}; \quad (14)$$

- відносна швидкість за довжиною збірного дренажного трубопроводу

$$\bar{V}_{\infty i} = \bar{V}_{k,\infty i} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1-x/l}{4A\bar{V}_{k,\infty i}}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A\bar{V}_{k,\infty i}}\right)^2} \right]; \quad (15)$$

- відносна швидкість у кінцевому перерізі збірного дренажного трубопроводу

$$\bar{V}_{\kappa,i} = \bar{V}_{\kappa,\infty i} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A\bar{V}_{\kappa,\infty i}} \right)^2} \right]. \quad (16)$$

При цьому діючий відносний перепад напорів і відносна швидкість також пов'язані співвідношенням:

$$\bar{z}_{\phi,\infty} = \sqrt{\frac{2\zeta_{l_{3\phi}} A}{3} \bar{V}_{\phi,\infty}^3}. \quad (17)$$

Прирівнявши вираз (11), для нескінченно довгого похильного дренажного трубопроводу (при $\bar{z}_{n,i} \rightarrow 0$) і вираз (12), отримаємо залежність для розрахунку відносної швидкості в кінці нескінченно довгого дренажного трубопроводу, прокладеного з похилом i , залежно від величини відносної швидкості в кінці фіктивного горизонтального трубопроводу нескінченної довжини:

$$\frac{2\zeta_{l_{3\phi}} A}{3} \bar{V}_{\infty i}^3 \mp 2B\bar{V}_{\infty i} - \frac{2\zeta_{l_{3\phi}} A_{\phi}}{3} \bar{V}_{\phi,\infty}^3 = 0. \quad (18)$$

З рівняння (18), при відомому $\bar{V}_{\phi,\infty}$, виразимо значення $\bar{V}_{\infty i}$. Підставивши його в (15) і виконавши нескладні перетворення, знайдемо значення $\bar{x}_{\infty i}$:

$$\bar{x}_{\infty i} = \frac{1}{2A} - 2\bar{V}_{\phi,\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{\frac{\bar{V}_{\infty i}}{\bar{V}_{\phi,\infty}} + \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A\bar{V}_{\phi,\infty}} \right)^2}}} - 1 \right]. \quad (19)$$

Для визначення співвідношень між $\bar{x}_{\infty i}$ і $\bar{x}_{\phi,\infty}$, при яких відносні швидкості в перерізах реального і фіктивного трубопроводів будуть однаковими ($\bar{V}_{\infty i} = \bar{V}_{\phi,\infty}$), прирівняємо значення $\bar{z}_{\infty i}$ з (13) і значення $\bar{z}_{\phi,\infty}$ з (17), отримаємо:

$$\bar{x}_{\phi,\infty} = \frac{1}{A} - 2\bar{V}_{\phi,\infty} \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\bar{z}_{\phi,\infty}}} - 1 \right). \quad (20)$$

Отримані вирази (19) і (20) дозволяють визначити значення відносної координати $\bar{x}_{\infty i}$ реального збірного дренажного трубопроводу в залежності від відносної координати $\bar{x}_{\phi,\infty}$ фіктивного трубопроводу, при яких величини відносних напорів $\bar{z}_{\infty i}$ і $\bar{z}_{\phi,\infty}$ або швидкостей $\bar{V}_{\infty i}$ і $\bar{V}_{\phi,\infty}$ (витрат $\bar{Q}_{\infty i}$ і $\bar{Q}_{\phi,\infty}$) будуть рівні між собою.

Висновки. У роботі отримано відносно прості і зручні аналітичні залежності і допоміжні графіки для розрахунку похильних збірних напірних дренажних трубопроводів, які працюють при наявності похилу поверхні РГВ. Представлені формули можуть використовуватись в широкому діапазоні зміни параметрів даних трубопроводів.

Отримані залежності для розрахунку збірних дренажних трубопроводів дозволять підвищити ефективність та надійність дренажних систем, стійкість до екстремальних погодних умов, зниження енерговитрат та покращити адаптацію до різних умов експлуатації.

Для подальших досліджень перспективним є більш детальне вивчення внутрішньої гідродинаміки потоку рідини у збірних дренажних трубопроводах.

Список використаних джерел

1. Sustainable intensification of agricultural drainage / M. J. Castellano, S. V. Archontoulis, M. J. Helmers, H. J. Poffenbarger, J. Six // *Nature Sustainability*. – 2019. – № 2. – Pp. 914-921. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0393-0>.
2. The evolution of agricultural drainage from the earliest times to the present / M. Valipour, J. Krasilnikof, S. Yannopoulos, R. Kumar, J. Deng, P. Roccaro, L. Mays, M. E. Grismer, A. N. Angelakis // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, № 1. – P. 416. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12010416>.
3. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices / L. Levidow, D. Zaccaria, R. Maia, E. Vivas, M. Todorovic, A. Scardigno // *Agricultural Water Management*. – 2014. – № 146. – Pp. 84-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>.
4. De Wrachien, D. Impacts of population growth and climate change on food production and irrigation and drainage needs: A world-wide view / D. De Wrachien, B. Schultz, M. B. Goli // *Irrigation and Drainage*. – 2021. – Vol. 70, № 5. – Pp. 981-995. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.2597>.
5. Олейник, А. Я. Дренаж переувлажненных земель / А. Я. Олейник, В. Л. Поляков. – Київ : Наукова думка, 1987. – 279 с.
6. Oyarce P. Experimental evaluation of agricultural drains / P. Oyarce, L. Gurovich, V. Duarte // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. – 2017. – Vol. 143, № 4. – P. 04016082. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.000113](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000113).
7. Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe / H. Liu, Q. Zong, H. Lv, J. Jin // *PLoS ONE*. – 2017. – № 12(10). – P. e0185842. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185842>.
8. Чернюк, В. В. Нерівномірність притоку води до напірного трубопроводу-збирача залежно від кута приєднання вхідних струменів / В. В. Чернюк, В. В. Іванів, М. Б. Ценюх // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2019. – Т. 29, № 9. – С. 116-120. DOI: <https://doi.org/10.36930/40290920>.
9. Кравчук, А. Проектування трубопроводів для рівномірного збору води вздовж шляху / А. Кравчук, Г. Кочетов, О. Кравчук // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. – 2020. – № 33. – С. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40>.
10. Variability of Darcy friction factor in differential equation for enforced flow in collector-pipeline / V. V. Cherniuk, V. Y. Fasuliak, I. V. Bihun, M. V. Cherniuk // *Proceedings of CEE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2024. – Vol. 438. – Pp. 58-69. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_7.
11. Розрахунок горизонтальних збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем при наявності похилу рівня ґрунтових вод / А. Кравчук, О. Кравчук, В. Барладіна, В. Перебийніс // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. – 2023. – № 102. – С. 58-64. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0501>.
12. Кравчук А. М. Вплив величини похилу на розрахункові параметри збірних дренажних трубопроводів / А. М. Кравчук, О. А. Кравчук // *Сучасне будівництво та архітектура*. – 2022. – № 2. – С. 88-96. DOI: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2022-2-88-96>.
13. Зміна параметрів збірних дренажних трубопроводів при пропуску транзитної витрати / А. Кравчук, О. Кравчук, А. Ломако, О. Кравчук // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. – 2022. – № 41. – С. 52-58. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.41.52-58>.
14. Kravchuk, O. A. Particularities of hydraulic calculation of collecting pressure drainage pipelines / O. A. Kravchuk // *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. – 2021. – № 83. – С. 130-138. DOI: <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2021-83-130-138>.
15. Двайт, Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт, пер. с англ. Н. В. Леви; под ред. К. А. Семендяева. – Москва : Наука, 1977. – 228 с.

References

1. Castellano, M. J., Archontoulis, S. V., Helmers, M. J., Poffenbarger, H. J., & Six, J. (2019). Sustainable intensification of agricultural drainage. *Nature Sustainability*, 2, 914-921. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0393-0>.
2. Valipour, M., Krasilnikof, J., Yannopoulos, S., Kumar, R., Deng, J., Roccaro, P., Mays, L., Grismer, M. E., & Angelakis, A. N. (2020). The evolution of agricultural drainage from the earliest times to the present. *Sustainability*, 12(1), 416. <https://doi.org/10.3390/su12010416>.
3. Levidow, L., Zaccaria, D., Maia, R., Vivas, E., Todorovic, M., & Scardigno, A. (2014). Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agricultural Water Management*, 146, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>.
4. De Wrachien, D., Schultz, B., & Goli, M. B. (2021). Impacts of population growth and climate change on food production and irrigation and drainage needs: A world-wide view. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 981-995. <https://doi.org/10.1002/ird.2597>.
5. Oleynik, O. Ya., & Poliakov, V. L. (1987). *Drenazh pereuvlazhnennykh zemel [Drainage of wetlands]*. Naukova dumka.
6. Oyarce, P., Gurovich, L., & Duarte, V. (2017). Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4), 04016082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.000113](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000113).
7. Liu, H., Zong, Q., Lv, H., & Jin, J. (2017). Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe. *PLoS ONE*, 12(10), e0185842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185842>.
8. Cherniuk, V. V., Ivaniv, V. V., & Tsenyuh, M. B. (2019). Nerivnomirnist prytoku vody do napirnoho truboprovodu-zbyracha zalezno vid kuta pryednannia vkhidnykh strumeniv [Dependence of non-uniformity of water inflow into pressure pipeline-collector on the angle of inflowing jets]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, 29(9), 116-120. <https://doi.org/10.36930/40290920>.
9. Kravchuk, A., Kochetov, G., & Kravchuk, O. (2020). Proektuvannia truboprovodiv dlia rivnomirnoho zboru vody vzdovzh shliakhu [Pipelines designing for steady water collection along the path]. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki – Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 33, 34-40. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40>.
10. Cherniuk, V. V., Fasuliak, V. Y., Bihun, I. V., & Cherniuk, M. V. (2024). Variability of Darcy Friction Factor in Differential Equation for Enforced Flow in Collector-Pipeline. *Proceedings of CEE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, 438, 58-69. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_7.
11. Kravchuk, A., Kravchuk, O., Barladina, V., & Perebyinis, V. (2023). Rozrakhunok horizontalnykh zbirnykh drenaznykh truboprovodiv melioratyvnykh system pry naiavnosti pokhylyu ravnii gruntovykh vod [Calculation of horizontal collective drainage pipelines of reclamation systems in the presence of a ground water level slope]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, constructional, road and melioration machines*, 102, 58-64. <https://doi.org/10.32347/gbdtmm.2023.102.0501>.
12. Kravchuk, A. M., & Kravchuk, O. A. (2022). Vplyv velychyny pokhylyu na rozrakhunkovi parametry zbirnykh drenaznykh truboprovodiv [The slope influence on calculated parameters of collecting drainage pipelines]. *Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura – Modern construction and architecture*, 2, 88-96. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2022-2-88-96>.
13. Kravchuk, A., Kravchuk, O., Lomako, A., & Kravchuk, O. (2022). Zmina parametriv zbirnykh drenaznykh truboprovodiv pry propusku tranzynoi vytraty [Variation of the collective drainage pipelines parameters when passing the transit flow]. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki – Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 41, 52-58. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.41.52-58>.
14. Kravchuk, O. A. (2021). Particularities of hydraulic calculation of collecting pressure drainage pipelines. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 83, 130-138. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2021-83-130-138>.
15. Dvayt, G. B. (1977). *Tablitsy integralov i drugie matematicheskie formuly [Tables of integrals and other mathematical formulas]* (N. V. Levi, Trans.; K.A. Semendyaev, Edit.). Nauka.

Отримано 01.02.2024

Andriy Kravchuk¹, Oleksandr Kravchuk², Oleksandr Voznyi³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of Water Supply and Water Disposal
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kravchuk.am@knuba.edu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-8732-9244>. **SCOPUS Author ID:** [57209316527](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=57209316527)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Water Supply and Water Disposal
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kravchuk.oa2@knuba.edu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6578-8896> **SCOPUS Author ID:** [55639047900](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=55639047900)

³student

Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: voznyi_ot@knuba.edu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0004-4222-1335>

OPERATIONAL FEATURES OF INCLINED COLLECTING DRAINAGE PIPELINES IN THE PRESENCE OF GROUNDWATER LEVEL SLOPE

The development of a reliable methodology for calculating drainage pipelines in reclamation systems is crucial for enhancing agricultural production efficiency and optimizing the use of water and land resources.

Many existing calculation methods do not consider the simultaneous influence of pipe slope and groundwater level slope on the characteristics and operating conditions of collecting drainage pipelines. Addressing this issue will contribute to the advancement of modern hydraulic engineering and hydromelioration.

The purpose of the article is to develop a methodology for calculating the parameters of pressure collecting drainage pipelines in reclamation systems, which are laid with a slope and operate in the presence of a groundwater level slope.

A system of differential equations describing the liquid motion in collecting drainage pipelines laid with a slope and operating with a certain groundwater level slope is presented in the article. This system includes a variable mass hydraulics equation and a modified filtration equation. The original system is reduced to a dimensionless form by introducing new variables. The solution to the equations system results in straightforward and easy-to-use analytical dependencies for calculating the main hydraulic and structural characteristics of precast drainage pipes. The analysis employs the concept of an infinitely long drainage pipeline operating with a groundwater level slope, equivalent to an inclined pipeline with an infinitely filtering capacity of the side surface walls. The impact of drainage pipe geometric slope and groundwater level on its design characteristics is evaluated.

The obtained dependencies for calculating collecting drainage pipelines will enhance the efficiency and reliability of drainage systems, improve resistance to extreme weather conditions, reduce energy consumption and enhance adaptation to various operating conditions.

Keywords: *drainage pipeline collecting; hydraulic friction factor; hydraulic conductivity; filtration resistance; geometric slope of the drainage pipe; variable fluid flow.*

Fig.: 2. References: 15.

Костянтин Мамонов¹, Василь Гой², Анна Штерндок³

¹доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0797-2609>

ResearcherID: F-4865-2018. **SCOPUS Author ID:** 56499279500

²кандидат економічних наук, докторант кафедри економіки та маркетингу Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: vasssgoi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1822-4478>

³старший судовий експерт лабораторії будівельно-технічних досліджень Національний науковий центр «Інститут судових експертиз імені Засл. проф. М. С. Бокаріуса» (Харків, Україна)

E-mail: anny13438381@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-9367-6932>

**ГЕОПРОСТОРОВИЙ МОНІТОРИНГ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ
ОБ'ЄДНАНИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД**

Для розробки й впровадження геопросторового моніторингу запропоновані напрями: моделювання узагальнюючих показників; створення бази геоданих показників; вибір просторової основи та прив'язка визначених показників за регіонами; розподіл зон формування інтегрального та узагальнюючих показників; здійснення аналізу інтегрального та узагальнюючих показників; візуальне представлення даних аналізу інтегрального та узагальнюючих показників на моніторинговій ГІС-карті; формування просторової основи показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі; побудова моніторингової ГІС-карти показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі; розробка моніторингової ГІС-карти прогнозних значень показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі залежно від змін інтегрального чинника використання земель ОТГ.

Ключові слова: геоінформаційні системи; геодезичне та землевпорядне забезпечення; використання земель; об'єднані територіальні громади; моніторинг; геопросторовий моніторинг.

Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. За останні роки спостерігається зростання кількості об'єднаних територіальних громад (ОТГ) як одного з важливих елементів, що характеризують результати реформи місцевого самоврядування. У цьому процесі особливого значення набуває формування земельного фонду та забезпечення ефективності його використання. Земельні ресурси є найбільшим чинником, застосування яких створює умови для розвитку об'єднаних територіальних громад.

За період військових дій відбувається зниження ефективності використання земель ОТГ, оскільки негативно впливають зовнішні й внутрішні чинники, наслідки агресії РФ. У цьому контексті виникає необхідність застосування сучасного моніторингового інструментарію із врахуванням особливостей геоінформаційних систем. На важливість останніх вказує розроблена система законодавчого забезпечення.

Постановка проблеми. В умовах трансформації місцевого самоврядування саме земельні ресурси виступають основним чинником, який впливає на їх функціонування та розвиток. У цьому контексті слід вказати на розроблене нормативно-правове забезпечення, сучасні наукові підходи. Проте залишаються проблемними питання підвищення ефективності використання земель на основі застосування сучасної моніторингової системи. На недостатньому рівні в систему земельних відносин регіонів впроваджуються й використовуються сучасні геоінформаційні системи, як важливий інструментарій здійснення моніторингових процедур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наявних дослідженнях визначені напрями та особливості здійснення моніторингових процедур [1–5].

Проблемні аспекти щодо застосування геоінформаційних систем виокремлені в роботах [6–8].

Водночас залишаються у фокусі уваги напрями та особливості здійснення моніторингу, враховуючи сучасний інструментарій геоінформаційних систем.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У сучасних дослідженнях відсутні єдині підходи щодо визначення моніторингу використання земель. Особливої уваги заслуговує формування типологічної структури з виокремленням просторових, мі-

стобудівних, екологічних, інвестиційних та інших чинників. Для забезпечення моніторингових процедур на недостатньому рівні сформовано геопросторове та інформаційно-аналітичне забезпечення. Тому потребує подальшого розвитку розробка впровадження багаторівневої системи моніторингових показників для створення кількісної основи моніторингу використання земель. Поряд зі значною кількістю методів оцінки відсутній єдиний інструментарій для здійснення інтегральної оцінки моніторингових показників. Це дозволить підвищити ефективність прийняття рішень у сфері земельних відносин та здійснити прогнозування змін та побудувати сценарій трансформаційних процесів, що відбуваються на регіональному рівні.

Метою статті є розробка й застосування геопросторового моніторингу використання земель ОТГ. У межах дослідження реалізовані напрями: визначення напрямів розробки геопросторового моніторингу використання земель ОТГ, виявлення особливостей використання геопросторового моніторингу для використання земель об'єднаних територіальних громад.

Проте, залишаються невирішеними питання забезпечення ефективності землекористування, враховуючи особливості розробки та застосування геопросторового моніторингу.

Отже, запропоновані напрями є актуальними для функціонування та розвитку об'єднаних територіальних громад.

Виклад основного матеріалу. Для розробки й впровадження геопросторового моніторингу запропоновані напрями:

1. Моделювання узагальнюючих показників.
2. Створення бази геоданих показників використання земель об'єднаних територіальних громад.
3. Вибір просторової основи та прив'язка визначених показників.
4. Розподіл зон формування інтегрального та узагальнюючих показників використання земель ОТГ за регіонами.
5. Здійснення аналізу інтегрального та узагальнюючих показників.
6. Візуальне представлення даних аналізу інтегрального та узагальнюючих показників на моніторинговій ГІС-карті.
7. Формування просторової основи показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі.
8. Побудова моніторингової ГІС-карти показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі.
9. Розробка моніторингової ГІС-карти прогнозних значень показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі залежно від змін інтегрального чинника використання земель ОТГ.

Геопросторовий моніторинг здійснюється на основі результатів оцінки інтегрального показника землекористування ОТГ, враховуючи вплив просторових, містобудівних, соціально-економічних, екологічних чинників. Крім того, особливого значення мають трансформації, які відбуваються із узагальнюючим критерієм регіонального розвитку. Застосовуючи інструментарій математичного моделювання встановлені причинно-наслідкові зв'язки між інтегральним показником землекористування та узагальнюючим чинником регіонального розвитку, що дозволило побудувати кількісну основу геопросторового моніторингу.

Отже, на основі сформованого кількісного підґрунтя із застосуванням сучасного геоінформаційного інструментарію побудовані відповідні моніторингові карти (рис. 1–8) для візуалізації процесів формування земельних ресурсів, їх використання на різних функціональних рівнях землекористування ОТГ.



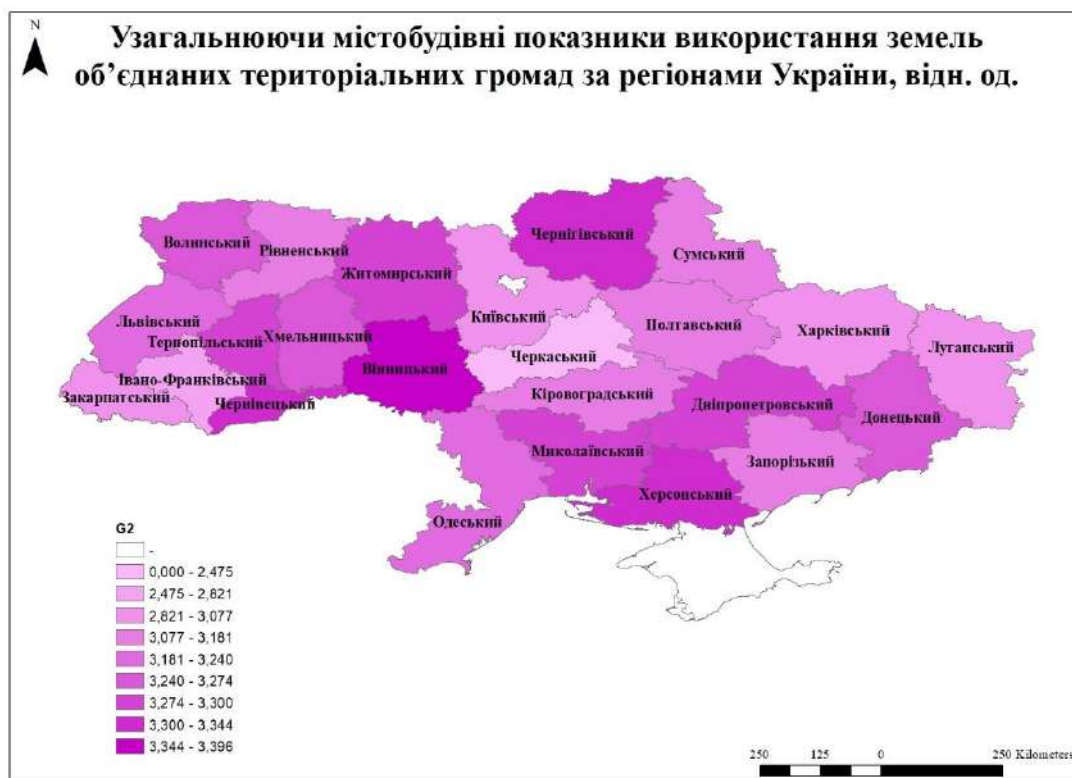
Рис. 1. Моніторингова ГІС-карта інтегрального показника використання земель ОТГ за регіонами України, відн. од.

Джерело: розроблено авторами.

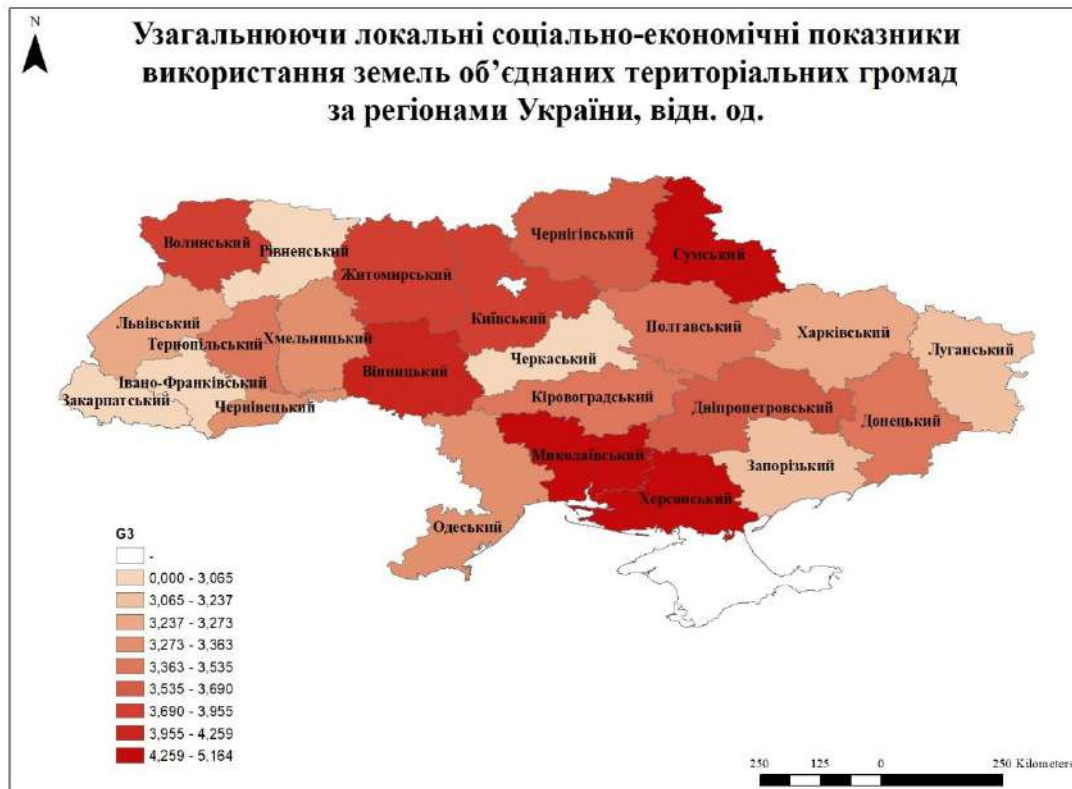


Рис. 2. Моніторингова ГІС-карта узагальнюючого просторового показника використання земель ОТГ за регіонами України, відн. од.

Джерело: розроблено авторами.



*Рис. 3. Моніторингова ГІС-карта узагальнюючого містобудівного показника використання земель ОТГ за регіонами України, відн. од.
Джерело: розроблено авторами.*



*Рис. 4. Моніторингова ГІС-карта узагальнюючого соціально-економічного показника використання земель ОТГ за регіонами України, відн. од.
Джерело: розроблено авторами.*



Рис. 5. Моніторингова ГІС-карта узагальнюючого екологічного показника використання земель ОТГ за регіонами України, відн. од.
Джерело: розроблено авторами.



Рис. 6. Моніторингова ГІС-карта показника зміни валового регіонального продукту на одиниці площі ОТГ за регіонами України, відн. од.
Джерело: розроблено авторами.



Рис. 7. Моніторингова ГІС-карта регресійного моделювання зміни валового регіонального продукту на одиницю площі залежно від зміни узагальнюючих показників використання земель ОТГ на 10 % за регіонами України, відн. од.
Джерело: розроблено авторами.



Рис. 8. Моніторингова ГІС-карта регресійного моделювання зміни валового регіонального продукту на одиницю площі залежно від зміни інтегрального показника використання земель ОТГ за регіонами України, відн. од.
Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Запропонований інструментарій геопросторового моніторингу використання земель, який базується на результатах інтегральної оцінки та математичного моделювання, що дозволяє сформулювати заходи забезпечення землекористування, попередити негативні явища й розробити рекомендації для розвитку об'єднаних територіальних громад.

Для розробки геопросторового моніторингу застосовується сучасний інструментарій геоінформаційних систем, геодезичне та землепорядне забезпечення.

Визначені напрями розробки моніторингу на основі реалізації інтегрального методу оцінки, результатів математичного моделювання чинників використання земель та їх впливу на валовий регіональний продукт на одиницю площі. Сформовано кількісну основу моніторингу використання земель ОТГ.

Список використаних джерел

1. Оверковська, Т. К. Моніторинг земель України: правові аспекти / Т. К. Оверковська // Юридичний вісник. – 2015. – № 1 (34). – С. 125-128. – Режим доступу: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rj>.
2. Горбатюк, В. М. Організаційно-технологічні особливості здійснення моніторингу земель на регіональному рівні / В. М. Горбатюк, К. В. Клименко // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2007. – Вип. 69. – С. 150-156. – Режим доступу: http://vlp.com.ua/files/22_51.pdf.
3. Горланчук, В. В. Управління земельними ресурсами : підручник / В. В. Горланчук, В. Г. В'юн, І. М. Песчанська. – Львів : Видавництво «Магнолія Плюс», 2006. – 443 с.
4. Перович, Л. М. Оцінка нерухомості : навч. посіб. / Л. М. Перович, Ю. П. Губар // Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2010. – 296 с.
5. Штерндок, Е. С. Моделювання впливу просторових факторів на оцінку та використання земель мегаполісу : дис... канд. техн. наук: 05.24.04 / Е. С. Штерндок. – Харків, 2017. – 246 с.
6. Генсецький, М. П. Методичні основи геоінформаційного забезпечення інженерних комунікацій в експлуатаційних системах [Електронний ресурс] : дис. ... канд. техн. наук: 05.24.01 / М. П. Генсецький. – Київ, 2004. – Режим доступу: <http://disser.com.ua/content/20248.html>.
7. Гордій, М. С. Проблеми та перспективи використання ГІС-картографування в Україні / М. С. Гордій // Часопис картографії. – 2012. – Вип. 4. – С. 23-30.
8. Мамонов, К. А. ГІС-забезпечення у раціональному використанні земельних ресурсів міської забудови / К. А. Мамонов, С. Г. Нестеренко, К. І. Вяткін // Науковий вісник будівництва. – 2016. – Т. 86. – № 4. – С. 323.

References

1. Overkovska, T. K. (2015). *Monitoryng zemel Ukrainy: pravovi aspekty* [Monitoring of lands of Ukraine: legal aspects]. *Yurydychnyi visnyk – Legal Bulletin*, 1 (34), 125–128. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rj>.
2. Horbatiuk, V. M., Klymenko, K. V. (2007). *Orhanizatsiino-tekhnologichni osoblyvosti zdiisnennia monitorynhu zemel na rehionalnomu rivni* [Organizational and technological features of land monitoring at the regional level]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 69, 150–156. http://vlp.com.ua/files/22_51.pdf.
3. Horlanchuk, V. V., Viun, V. H., Peschanska, I. M. (2006). *Upravlinnia zemelnymy resursamy* [Management of land resources]. *Mahnoliia Plus*.
4. Perovych, L. M., Hubar, Yu. P. (2010). *Otsinka nerukhomosti* [Property valuation]. *Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki*.
5. Shterndok, E. S. (2017). *Modeliuvannia vplyvu prostorovykh faktoriv na otsinku ta vykorystannia zemel mehapolisu* [Modeling the influence of spatial factors on the evaluation and use of land in the metropolis]. *Candidate's thesis*.
6. Hensetskyi, M. P. (2004). *Metodychni osnovy heoinformatsiinoho zabezpechennia inzhenernykh komunikatsii v ekspluatatsiinykh systemakh* [Methodological foundations of geoinformation provision of engineering communications in operational systems]. *Candidate's thesis*. <http://disser.com.ua/content/20248.html>.
7. Hordiy, M. S. (2012). *Problemy ta perspektyvy vykorystannia HIS-kartohrafuvannia v Ukraini* [Problems and prospects of using GIS mapping in Ukraine]. *Chasopys kartohrafii – Journal of cartography*, 4, 23–30.

8. Mamonov, K. A., Nesterenko, S. H., Viatkin, K. I. (2016). HIS-zabezpechennia u ratsionalnomu vykorystanni zemelnykh resur-siv miskoi zabudovy [GIS support in the rational use of land resources of urban development. Scientific Bulletin of Construction]. *Naukovyi visnyk budivnytstva – Scientific bulletin of construction*, 86(4), 323.

Отримано 18.03.2024

UDC 528.4:332.3

Kostiantyn Mamonov ¹, Vasyl Goi ², Anna Shterndok ³

¹Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0797-2609>

ResearcherID: F-4865-2018. **SCOPUS Author ID:** 56499279500

²PhD in Economic Science, Doctoral Candidate at the Department of Economics and Marketing

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: vasssgoi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1822-4478>

³Senior forensic expert of the Laboratory of Construction and Technical Research, National Research Center «Institute of Forensic Expertise named after Post Prof. M. S. Bokarius», (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: anny13438381@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-9367-6932>

GEOSPATIAL MONITORING OF LAND USE OF UNITED TERRITORIAL COMMUNITIES

The relevance of research directions is proven. The goal of the research on the development and application of geospatial monitoring of land use of united territorial communities has been achieved. Within the framework of the study, the following directions were implemented: determination of the directions for the development of geospatial monitoring of land use of the UTC; identifying the features of the use of geospatial monitoring for the use of lands of united territorial communities.

For the development and implementation of geospatial monitoring of land use of united territorial communities, the following directions are proposed: modeling of general indicators of land use of united territorial communities; creation of a geodata base of land use indicators of united territorial communities taking into account spatial, urban planning, socio-economic and ecological features; the selection of the spatial basis and the binding of the determined indicators of the use of land of the UTC by regions; distribution of zones for the formation of integral and generalizing indicators of land use of the UTC by regions; carrying out an analysis of integral and generalizing indicators of land use of the UTC by regions; visual representation of the data of the analysis of integral and general indicators on the monitoring GIS map; formation of the spatial basis of the indicator of changes in gross regional product per unit area; construction of a monitoring GIS map of the indicator of changes in gross regional product per unit area; development of a monitoring GIS map of forecast values of the indicator of changes in the gross regional product per unit of area depending on changes in the integral factor of land use of the UTC. The proposed geospatial monitoring of land use of the UTC is defined as an element of scientifically based recommendations for the formation and implementation of monitoring for increasing the efficiency of land use in the context of creating conditions for regional development.

Development directions for land use monitoring of united territorial communities have been determined based on the implementation of the integral assessment method, the results of mathematical modeling of land use factors and their impact on the gross regional product per unit area. A quantitative basis for monitoring the use of land of the UTC has been formed.

Keywords: geoinformation systems; geodetic and land management support; land use; united territorial communities; monitoring; geospatial monitoring.

References: 8.

Ольга Петраковська¹, Марія Михальова²

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри землеустрою і кадастру
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: 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

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри землеустрою і кадастру
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: mykhalova.myu@knuba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9437-5507>
Scopus Author ID: [57245147600](https://orcid.org/57245147600) ResearcherID: U-7863-2017

СТРУКТУРИЗАЦІЯ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ЗОН З ПОГЛЯДУ ВСТАНОВЛЕННЯ ОБМЕЖЕНЬ У ВИКОРИСТАННІ ЗЕМЕЛЬ

Встановлення обмежень щодо використання земель, як механізм забезпечення сприятливих умов життєдіяльності населення та сталого розвитку територій, має вагоме значення. Проведено аналіз коректності назв територіальних зон (груп об'єктів) їхньому змістовному наповненню, мети їх встановлення відповідно до законодавчо визначених обмежень для реєстрації в державному земельному кадастрі. Проведене дослідження дозволило структурувати законодавчо визначені зони й об'єднати їх в дві агреговані групи: об'єкт зазначений в назві не має відношення до накладання обмежень у використанні земель; об'єкти зазначені в назві є підставою або передумовою для накладання обмежень. Результати дослідження ілюструють необхідність в удосконаленні понятійного апарату щодо назв територіальних зон; впорядкувати територіальні зони, якими визначено обов'язковість накладання обмежень.

Стаття є науково-методичною.

Ключові слова: територіальна зона; державний земельний кадастр; обмеження у використанні земель; обліковий номер; реєстрація.

Табл.: 1. Бібл.: 37.

Актуальність теми дослідження. Земельні ресурси є просторовим базисом для розселення та господарської діяльності, розміщення об'єктів будівництва та використання їх як основного засобу виробництва в господарстві. Можливі напрямки використання земельних ресурсів та їх обмеження суттєво впливають на економічний стан суб'єктів господарювання, що має важливе значення в умовах ринкової економіки. Належний інформаційний супровід органів державної влади, місцевого самоврядування, фізичних та юридичних осіб, в питаннях управління земельними ресурсами та охорони земель, – це функція державного земельного кадастру (ДЗК). Одним із ключових завдань при визначенні легітимності можливих напрямків використання земель є ідентифікація об'єктів в інформаційній системі за допомогою заздалегідь визначених ідентифікаторів, які сприймається системами. Максимальна ідентифікація об'єктів досягається в першу чергу чітким і однозначним визначенням термінів яке виключає можливість різного тлумачення і розуміння їх змістовної сутності. Це є ключовими для забезпечення прозорості, правової визначеності та захисту прав та обов'язків громадян та суб'єктів господарювання.

Постановка проблеми. Використання земельних ресурсів пов'язане з проблемами, які можуть виникати на різних етапах розвитку суспільства. Рішення цих проблем вимагає комплексного підходу, який враховує правові, екологічні, економічні, технічні та соціальні аспекти. Забезпечення довгострокового соціально-економічного зростання країни в цілому, регіонів і населених пунктів та раціональне використання природних ресурсів загалом і земельних зокрема, є важливими завданнями сьогодення. Одним із методів забезпечення збалансованого розвитку територій і використання різних категорій земель є формування обмежень на певні види діяльності.

В Україні обмеження у використанні земель є об'єктом Державного земельного кадастру, яке відповідно до законодавства, підлягає обов'язковій реєстрації. У статті розглянуто методологічний підхід до одного з етапів формування обмежень – ідентифікації об'єкта державного земельного кадастру. Обґрунтованість і пояснення методологічних підходів поділу територіальних зон наданих у Порядку ведення державного земельного кадастру відсутня, що ускладнює її сприйняття і розуміння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки метою дослідження є визначення коректності назв територіальних зон їх змістовному наповненню, у роботі були досліджені державні нормативно-правові акти [1; 3; 4; 5].

Мета дослідження. Визначити відповідність назв територіальних зон (груп об'єктів) їх змістовному наповненню, меті встановлення, а також провести їх структуризацію відповідно до законодавчо визначених обмежень, що підлягають обов'язковій реєстрації в державному земельному кадастрі. У процесі дослідження використано методи аналізу та синтезу.

Виклад основного матеріалу. Одним з етапів формування обмежень є їх реєстрація і присвоєння облікового номера. Першим структурним елементом облікового номера є код територіальної зони, у межах якої діють певні обмеження. Ці обмеження можуть діяти як на окремі земельні ділянки приватної власності, так і на земельні масиви державної та комунальної власності.

Структура облікового номера об'єкта ДЗК (крім земельної ділянки (ЗД)) має наступний вигляд [15]:

$$\text{КГО} : \text{ВОК} : \text{ПНО}, \quad (1)$$

де КГО – тризначне число, яке є кодом територіальної зони (групи об'єктів ДЗК (крім земельних ділянок));

ВОК – шестизначне число, яке є позначенням виду обмеження як об'єкта ДЗК;

ПНО – десятизначне число, яке є порядковим номером обмеження ДЗК.

З огляду на те що, що територіальна зона є складовою облікового номера обмежень у використанні земель і групою об'єктів Державного земельного кадастру, проведено їх дослідження відповідно до [15], де визначено 29 груп різних зон.

Для подальшого дослідження ролі територіальних зон при встановленні обмежень, зазначений вище перелік був розглянутий з погляду значення тієї чи іншої територіальної зони в процесі формування обмежень щодо використання земель [5-11; 13; 14; 16-19; 21; 23; 24]. Проведений аналіз наведений у табл. 1.

Таблиця 1

Коректність формування законодавчо встановлених територіальних зон (груп об'єктів) щодо формування обмежень у використанні земель

Код зони	Назви територіальних зон (груп об'єктів)	Мета /законодавство що регулює	Аналітичні коментарі/коректність назви
1	2	3	4
001	Межі адміністративно-територіальних утворень	Межа відокремлює територію адміністративно-територіальних утворень від інших [22]	Межа як умовна лінія на поверхні землі, що відокремлює територію одного утворення від іншого не є зоною. Не спричиняє обмежень
002	Зони розподілу земель за їх основним цільовим призначенням	Визначають допустимі напрями використання ЗД відповідно до встановлених законом вимог щодо використання земель відповідної категорії та визначеного виду цільового призначення [2]	Обмеження встановлюються для ЗД кожного окремого виду цільового призначення, тому таке узагальнення не визначає встановлення конкретних видів обмежень
003	Економіко-планувальні зони	Встановлюються в процесі нормативної оцінки земель [3]	Не визначає обмежень у використанні земель
004	Зони агровиробничих груп ґрунтів	Об'єднання ґрунтів з близькими агрономічними властивостями та рівнем родючості [2]	Може бути передумовою для встановлення обмежень, але належність до певної агровиробничої групи не визначає накладання обмежень
005	Зони дії земельних сервітутів	Визначає межі можливого користування чужою ЗД [2]	Встановлює обмеження щодо використання земель власниками та іншими особами
006	Зони дії обмежень використання земель	Встановлюються відповідно до положень законодавства та розроблених різних видів документації	Це є агрегована група, до якої фактично входять зони (007,008, 009, 010, 011,012)

Продовження табл. 1

1	2	3	4
007	Зони регулювання забудови (ЗРЗ) (функціональні зони)	ЗРЗ - визначені в містобудівній документації межі зон для збереження домінуючої ролі пам'яток [28; 37]. Лінії регулювання забудови визначають межі розташування будинків і споруд [32]	ЗРЗ відповідно ДСТУ Б 5.2.2-10:2016 – територія, яка виділяється для збереження пам'яток. Поняття ліній регулювання забудови [32] передбачає обмеження щодо використання земель в частині розташування будинків і споруд не враховані. ЗРЗ і функціональні зони є різними за сутністю і не можуть бути використані як тотожні поняття.
008	Зони санітарної охорони	Створюються навколо об'єктів для їх санітарно-епідеміологічної захищеності [27; 30]	Розташування в зоні є підставною для накладання законодавчо визначених обмежень на ЗД
009	Охоронні зони	Створюються навколо об'єктів, з метою охорони і захисту їх від несприятливих антропогенних впливів; для забезпечення нормальних умов експлуатації об'єктів, запобігання ушкодження, а також зменшення їх негативного впливу на людей та довкілля тощо [8; 12-14; 16; 18; 20; 21; 23; 24; 26; 29; 31; 33; 34-36]	Розташування в зоні є підставною для накладання законодавчо визначених обмежень. Правовий режим охоронних зон відрізняється залежно від об'єкта, навколо якого встановлена зона, проте завжди передбачає обмеження щодо можливих видів використання ЗД.
010	Зони особливого режиму використання земель	Створюються для забезпечення функціонування об'єктів їх збереження, охорони, а також захисту населення, господарських об'єктів і довкілля від впливу аварійних ситуацій, стихійних лих і пожеж [6; 10]	Розташування в зоні є підставною для накладання законодавчо визначених обмежень
011	Водоохоронні зони	Створюються для забезпечення сприятливого режиму водних об'єктів, попередження їх забруднення, засмічення і вичерпання, знищення навколоводних рослин і тварин, а також зменшення коливань стоку вздовж річок, морів та навколо озер, водосховищ і інших водойм [2; 3; 22; 29; 32]	Розташування в зоні є підставною для накладання законодавчо визначених обмежень
012	Прибережні захисні смуги	Встановлюються вздовж річок, морів і навколо озер, водосховищ та інших водойм з метою охорони поверхневих водних об'єктів від забруднення і засмічення та збереження їх водності [1; 2]	Розташування в зоні є підставною для накладання законодавчо визначених обмежень, є просторовою складовою зони 011
013	Природно-сільськогосподарські зони	Одиниця районування території України, визначає головні особливості ґрунтоутворення, формує зональні типи та підтипи ґрунтів [17]. Є основою для нормативної грошової оцінки земель с/г призначення	Може бути передумовою для обмежень щодо використання різних типів ґрунтів, але не є законодавчою підставою для накладання обмежень
014	Еколого-економічні зони	Одиниця районування, яка відображає ступінь перетворення природного середовища внаслідок антропогенного впливу, стійкість природного середовища до антропогенного навантаження, несприятливі природно-антропогенні процеси та еколого-економічну оцінку території [17]	Може бути передумовою для встановлення обмежень щодо використання територій, що зазнали антропогенного навантаження, але не є законодавчою підставою для накладання обмежень
015	Зони протиерозійного районування (зонування)	Одиниця районування, яка відображає стан еродованості ґрунтів, інтенсивність ерозійних процесів, їх динаміку, природні та антропогенні передумови розвитку. На основі схем (карт) здійснюється прогнозування процесів ерозії з метою визначення відповідних протиерозійних заходів [17]	Може бути передумовою для встановлення обмежень щодо використання територій, що зазнали наслідки різних видів антропогенних процесів, але не є законодавчою підставою для накладання обмежень

Продовження табл. 1

1	2	3	4
016	Ключові території екомережі (території та об'єкти природно-заповідного фонду тощо)	Структурні елементи екомережі, забезпечують збереження найбільш цінних і типових для даного регіону компонентів ландшафтного та біорізноманіття [11]	Передбачається встановлення визначених законом обмежень при обґрунтуванні необхідності
017	Сполучні території екомережі	Структурні елементи екомережі, поєднують ключові території, забезпечують міграцію тварин та обмін генетичного матеріалу	Передбачається встановлення визначених законом обмежень при обґрунтуванні необхідності
018	Буферні зони екомережі	Структурні елементи екомережі, забезпечують захист ключових та сполучних територій від зовнішніх впливів	Передбачається встановлення визначених законом обмежень при обґрунтуванні необхідності
019	Відновлювані території екомережі	Структурні елементи екомережі, забезпечують формування просторової цілісності екомережі, мають бути відтворені до первинного природного стану	Передбачається встановлення передбачених законом обмежень при обґрунтуванні необхідності
020	Земельні угіддя	Визначення поняття “земельні угіддя” в сучасному правовому полі немає	В переліку земельних угідь наданих в додатку 4 [15], головною ознакою, що покладена в основу розділення окремих видів угідь є характер їх використання. При цьому класифікація угідь проводиться з урахуванням основного призначення і систематичного використання окремих ділянок землі для певних виробничих цілей. У межах кожного виду угідь можуть бути накладні різні обмеження
021	Інші територіальні зони	Перелік не визначений	У межах зон можуть накладатись обмеження передбачені законодавством відповідно до особливостей зони
022	Масив земель сільськогосподарського призначення	Врегулюють питання використання та розпорядження земельними ділянками, розташованими у масиві земель с/г призначення [2; 19]	Може бути встановлено обмеження щодо використання окремих угідь що входять до масиву земель с/г призначення, але розташування в масиві не визначає накладання обмежень
023	Межі територій, на яких розташовані ЗД, необхідні для розміщення об'єктів, щодо яких може здійснюватися примусове відчуження ЗД з мотивів суспільної необхідності	Для резервування земель необхідних для будівництва об'єктів суспільної необхідності [2; 7]	Межа як умовна лінія не є зоною і не спричиняє обмежень. На територіях необхідних для розміщення об'єктів, суспільної необхідності де може здійснюватися примусове відчуження ЗД діють обмеження
024	Межі функціональних зон (ФЗ)	Межа як умовна лінія на поверхні землі, що відокремлює територію однієї функціональної зони від іншої [28]	Межа як умовна лінія не може бути зоною, в межах якої діють обмеження. Обмеження діють в межах функціональної зони відповідно до законодавства
025	Державний кордон України	Державний кордон України є лінія і вертикальна поверхня, що проходить по цій лінії, які визначають межі території України [10]	Лінія не може бути зоною в межах якої діють обмеження. Вздовж державного кордону встановлюється прикордонна смуга з урахуванням особливостей місцевості та умов, в межах якої діють обмеження

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
026	Межі територій територіальних громад (ТГ)	Межа як умовна лінія на поверхні землі, що відокремлює територію однієї громади від іншої	Межа не може бути зоною. В межах ТГ можуть діяти будь які обмеження з урахуванням особливостей, умов та вимог зон для яких безпосередньо встановлені обмеження
027	Меліоративна мережа (ММ), складова частина меліоративної мережі	Забезпечує заходи з метою регулювання водного, теплового, повітряного і поживного режиму ґрунтів, збереження і підвищення їх родючості та формування екологічно збалансованої раціональної структури угідь [25]	Є передумовою встановлення обмежень відповідно до особливостей об'єктів ММ. Розташування в межах ММ не визначає накладання конкретних обмежень
028	Території, на яких здійснюються заходи щодо охорони земель і ґрунтів	Сприятиме широкій обізнаності власників і користувачів ЗД, органів місцевого самоврядування щодо наявних заборон або обмежень у використанні земель, дозволених або не заборонених умов і режимів використання ЗД	Внесення до ДЗК відомостей про заходи щодо охорони земель і ґрунтів та відповідних заборон або обмежень у використанні земель є підставою для накладання обмежень
029	Режимоутворюючий об'єкт (РУО)	Об'єкт природного або штучного походження, під яким та /або навколо якого згідно із законом встановлюються обмеження у використанні земель [9]	Обумовлює встановлення обмежень. Правовий режим зон відрізняється залежно від РУО, завжди передбачає обмеження щодо можливих видів використання Зд, наявність РУО є підставою для формування зон 007,008, 009, 010, 011,012

Проведене дослідження ілюструє відсутність обґрунтованості і пояснення методологічних підходів щодо поділу територіальних зон [9; 15], що ускладнює сприйняття і розуміння суті територіальних зон (груп об'єктів).

Відповідно до вимог до змісту, структури і технічних характеристик електронного документа [15, додаток 1, 43, 43¹], стає зрозуміло, що не у всіх територіальних зонах (групах об'єктів) передбачається встановлення обмежень чітко визначених законодавством. У статті проведено детальний аналіз усіх територіальних зон (груп об'єктів) з погляду їх значення для обмеження певних видів діяльності. Враховуючи що засадами формування територіальної зони є тотожність вимог, умов використання та властивостей функціонування певних територій, не всі з наведеного переліку мають відношення до обмежень у використанні земель. Наприклад, економіко-планувальні зони встановлюються на основі економічної оцінки шляхом об'єднання оціночних районів та відокремлення однотипних зон за споживчими якостями та функціональним використанням. Само по собі їх формування не передбачає встановлення обмежень в цих зонах.

Важливо зазначити, що серед основних видів зон, якими обмежуються певні види діяльності, як в земельному, так і в містобудівному законодавстві є: санітарно-захисні, зони санітарної охорони й охоронні зони. Однак у законодавчо визначеному переліку територіальних зон, відсутня санітарно-захисна, хоча це зона, яка строюються навколо об'єктів, які є джерелами негативного впливу для відокремлення таких об'єктів від територій житлової забудови [2, ст.114]. Сама сутність цієї зони обумовлює її широке застосування при встановленні обмежень у використанні земель.

В роботі проведений детальний аналіз коректності назв територіальних зон (груп об'єктів) їх змістовному наповненню, мети їх встановлення, відповідності законодавчо визначеним обмеженням для подальшої реєстрації в ДЗК. Проведене дослідження дозволило виявити, що в переліку законодавчо визначених зон, які є структурною одиницею облікового номера обмежень у використанні земель, існують такі випадки:

1. Об'єкт зазначений в назві не має відношення до накладання обмежень у використанні земель (001, 002, 003, 020, 026)

2. Об'єкти зазначені у назві є підставою або передумовою для накладання обмежень. Серед них:

1. Некоректність назви, але об'єкт зазначений в назві є передумовою накладання обмежень у використанні земель (023, 024, 025, 027, 029)

2. Назва територіальної зони коректна, і об'єкт є передумовою для накладання законодавчо визначених обмежень, але необхідно проведення додаткових процедур і досліджень для обґрунтованого формування зони обмежень і їх подальшої реєстрації в ДЗК (004, 013, 014, 015, 016, 017, 018, 019, 022, 028)

3. Назва територіальної зони коректна, і об'єкт є підставою для накладання законодавчо визначених обмежень (005, 006, 007, 008, 009, 010, 011, 012)

Таким чином, тільки 28 % законодавчо визначених територіальних мають коректну назву і є підставою для накладання визначених законодавством обмежень.

Висновки. Враховуючи, що територіальні зони є структурною складовою облікового номера обмежень при їх реєстрації в ДЗК, необхідно: удосконалити понятійний апарат щодо назв територіальних зон; впорядкувати територіальні зони якими визначено обов'язковість накладання обмежень.

Список використаних джерел

1. Водний Кодекс України № 213/95-ВР від 06.06.1995 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>.

2. Земельний кодекс України № 2768-III від 25.10.2001 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>.

3. Методика нормативної грошової оцінки земельних ділянок. Постанова Кабінету Міністрів України № 1147, 03.11.2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1147-2021-%D0%BF#Text>.

4. Петраковська, О. Підходи до класифікації і реєстрації обмежень у використанні земель / О. Петраковська, М. Михальова // Просторовий розвиток. – 2023. – № 6. – С. 329-337. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.329-337>.

5. Петраковська, О. Структуризація обмежень щодо використання земель в Україні / О. Петраковська, М. Михальова // Просторовий розвиток. – 2023. – № 3. – С. 134-143. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.3.134-143>.

6. Про використання земель оборони [Електронний ресурс] : Закон України 1345-IV від 27.11.2003. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1345-15>.

7. Про відчуження земельних ділянок, інших об'єктів нерухомого майна, що на них розміщені, які перебувають у приватній власності, для суспільних потреб чи з мотивів суспільної необхідності [Електронний ресурс] : Закон України № 1559-VI від 17.11.2009. – Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1559-17>.

8. Про гідрометеорологічну діяльність [Електронний ресурс] : Закон України 443-XIV від 18.02.1999. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/443-14#Text>.

9. Про державний земельний кадастр [Електронний ресурс] : Закон України № 3613-VI від 07.07.2011. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3613-17>.

10. Про державний кордон України [Електронний ресурс] : Закон України 1777-XII від 04.11.1991. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1777-12#Text>.

11. Про екологічну мережу. Закон України 1864-IV 24.06.2004 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15#Text>

12. Про екологічну мережу [Електронний ресурс] : Закон України 1864-IV від 24.06.2004. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15#Text>.

13. Про залізничний транспорт [Електронний ресурс] : Закон України № 273/96-ВР від 04.07.1996. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80>.

14. Про затвердження Єдиних правил ремонту і утримання автомобільних доріг, вулиць, залізничних переїздів, правил користування ними та охорони. Постанова Кабінету Міністрів України № 198, 30.03.1994 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/198-94-%D0%BF#Text>

15. Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів № 1051 від 17.10.2012. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012>.

16. Про затвердження Порядку встановлення охоронних зон навколо об'єктів, призначених для гідрометеорологічних спостережень та інших видів гідрометеорологічної діяльності, та режиму їх використання. Постанова Кабінету Міністрів України № 2262 від 11.12.1999 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2262-99-%D0%BF#Text>.

17. Про затвердження Порядку здійснення природно-сільськогосподарського, еколого-економічного, протиерозійного та інших видів районування земель. Постанова Кабінету Міністрів України № 681 від 26.05.2004 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/681-2004-%D0%BF>.

18. Про затвердження Порядку охорони геодезичних пунктів. Постанова Кабінету Міністрів України № 836 від 08.11.2017 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/836-2017-%D0%BF#Text>.

19. Про затвердження порядку проведення інвентаризації земель. Постанова Кабінету Міністрів України № 476 від 05.06.2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/476-2019-%D0%BF#Text>.

20. Про затвердження Правил охорони ліній електрозв'язку. Постанова Кабінету Міністрів України № 135 від 29.01.1996 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/135-96-%D0%BF>.

21. Про затвердження Правил охорони магістральних трубопроводів. Постанова Кабінету Міністрів України № 1747 від 16.11.2002 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1747-2002-%D0%BF>.

22. Про землеустрій. Закон України 858-IV в редакції 22.05.2003 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15>

23. Про землі енергетики та правовий режим спеціальних зон енергетичних об'єктів. Закон України № 2840-VI від 09.07.2010 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2480-17>.

24. Про курорти. Закон України № 2026-14 від 05.10.2000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2026-14>.

25. Про меліорацію земель. Закон України №1389-XIV від 14.01.2000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1389-14#Text>

26. Про охорону культурної спадщини. Закон України № 1805-III від 08.06.2000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14#Text>.

27. Про питну воду, питне водопостачання та водовідведення. Закон України № 2918-III від 10.01.2002 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14#Text>.

28. Про планування і забудову. ДБН Б.2.2-12:2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2019/07/DBN-B22-12-2019.pdf>.

29. Про порядок визначення розмірів і меж водоохоронних зон та режим ведення господарської діяльності в них. Постанова Кабінету Міністрів України № 486 від 08.05.1996 [Електронний ресурс]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/486-96-%D0%BF#Text>.

30. Про правовий режим зон санітарної охорони водних об'єктів. Постанова Кабінету Міністрів України № 2024 від 18.12.1998 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2024-98-%D0%BF#Text>.

31. Про природно-заповідний фонд України. Закон України № 2456-XII від 16.06.1992 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#Text>.

32. Про регулювання містобудівної діяльності. Закон України № 3038-VI від 17.02.2011 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>.

33. Про ринок електричної енергії. Закон України № 2019-VIII від 13.04.2017 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>.

34. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність. Закон України № 2019-VIII від 23.12.1998 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.

35. Про транспорт. Закон України № 232/94-ВР від 10.11.1994 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80>.

36. Про трубопровідний транспорт. Закон України № 192/96-ВР від 15.05.1996 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/192/96-%D0%B2%D1%80>.

37.Склад та зміст науково-проектної документації щодо визначення меж і режимів використання зон охорони пам'яток архітектури та містобудування. ДСТУ Б 5.2.2-10:2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65083.

References

1. Vodnyi Kodeks Ukrainy [Water Code of Ukraine] (№ 213/95-VR, 6.06. 1995). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>.
2. Zemelnyi kodeks Ukrainy [Land Code of Ukraine] (№ 2768-III, 25.10.2001). <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>.
3. Metodyka normatyvnoi hroshovoi otsinky zemelnykh dilianok [Methodology of normative monetary assessment of land plots], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 1147, 03.11.2021). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1147-2021-%D0%BF#Text>.
4. Petrakovska, O., & Mykhalova, M. (2023). Pidkhody do klasyfikatsii i reiestratsii obmezhen u vykorystanni zemel [Approaches to classification and registration of land use limitations]. *Prostorovyi rozvytok – Spatial development*, 6, 329–337. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.329-337>.
5. Petrakovska, O., & Mykhalova, M. (2023). Strukturyzatsiia obmezhen shchodo vykorystannia zemel v Ukraini [Structuring of land use restrictions in Ukraine]. *Prostorovyi rozvytok – Spatial development*, 3, 134–143. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.3.134-143>.
6. Pro vykorystannia zemel oborony [On the use of defense lands], Law of Ukraine (1345-IV 27.11.2003). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1345-15>.
7. Pro vidchuzhennia zemelnykh dilianok, inshykh ob'ektiv nerukhomoho maina, shcho na nykh rozmishcheni, yaki перебувають у приватній власності, для суспільних потреб чи з мотивів суспільної необхідності [On the alienation of land plots, other real estate objects located on them, which are in private ownership, for public needs or for reasons of public necessity], Law of Ukraine. (№ 1559-VI, 17.11.2009). <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1559-17>.
8. Pro hidrometeorolohichnu diialnist [On hydrometeorological activity], Law of Ukraine (№ 443-XIV 18.02.1999). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/443-14#Text>.
9. Pro derzhavnyi zemelnyi kadastr [On the state land cadaster], Law of Ukraine (№ 3613-VI, 07.07.2011). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3613-17>.
10. Pro derzhavnyi kordon Ukrainy [On the state border of Ukraine], Law of Ukraine (№ 1777-XII, 04.11.1991). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1777-12#Text>.
11. Pro ekolohichnu merezhu [On the ecological network], Law of Ukraine (№ 1864-IV 24.06.2004). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15#Text>.
12. Pro elektronni komunikatsii [On electronic communications], Law of Ukraine (№ 1089-IX 16.12.2020). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1089-20#Text>.
13. Pro zaliznychnyi transport [On railway transport], Law of Ukraine (№ 273/96-VR, 04.07.1996). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80>.
14. Pro zatverdzhennia Yedynykh pravyl remontu i utrymannia avtomobilnykh dorih, vulyts, zaliznychnykh pereizdiv, pravyl korystuvannia nymy ta okhorony [On the approval of the Uniform rules for the repair and maintenance of highways, streets, railway crossings, rules for their use and protection], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 198 30.03.1994). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/198-94-%D0%BF#Text>.
15. Pro zatverdzhennia Poriadku vedennia Derzhavnoho zemelnoho kadastru [On approval of the Procedure for maintaining the State Land Cadastres], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 1051 17.10.2012). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012>.
16. Pro zatverdzhennia Poriadku vstanovlennia okhoronnykh zon navkolo ob'ektiv, pryznachenykh dlia hidrometeorolohichnykh sposterezhen ta inshykh vydiv hidrometeorolohichnoi diialnosti, ta rezhymu yikh vykorystannia [On the approval of the Procedure for establishing protection zones around objects intended for hydrometeorological observations and other types of hydrometeorological activities, and the regime of their use], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 2262 11.12.1999). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2262-99-%D0%BF#Text>.
17. Pro zatverdzhennia Poriadku zdiisnennia pryrodno-silskohospodarskoho, ekoloho-ekonomichnoho, protyeroziinoho ta inshykh vydiv raionuvannia zemel [On approval of the Procedure for implementation of natural-agricultural, ecological-economic, anti-erosion and other types of land zoning. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 681 26.05.2004). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/681-2004-%D0%BF>.

18. Pro zatverdzhennia Poriadku okhorony heodezychnykh punktiv [On the approval of the Procedure for the protection of geodetic points], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 836 08.11.2017). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/836-2017-%D0%BF#Text>.

19. Pro zatverdzhennia poriadku provedennia inventaryzatsii zemel [On approval of the procedure for carrying out land inventory], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 476 05.06.2019). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/476-2019-%D0%BF#Text>.

20. Pro zatverdzhennia Pravyl okhorony liniy elektrozv'iazku [On the approval of the Rules for the protection of telecommunication lines], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 135, 29.01.1996). <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/135-96-%D0%BF>.

21. Pro zatverdzhennia Pravyl okhorony mahistralnykh truboprovodiv [On the approval of the Rules for the protection of main pipeline], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 1747, 16.11.2002). <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1747-2002-%D0%BF>.

22. Pro zemleustrii [On land management], Law of Ukraine (№ 858-IV, 22.05.2003). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15>.

23. Pro zemli enerhetyky ta pravovyi rezhym spetsialnykh zon enerhetychnykh ob'ektiv [On energy lands and the legal regime of special zones of energy facilities], Law of Ukraine (№ 2840-VI, 09.07.2010). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2480-17>.

24. Pro kurorty [On resorts], Law of Ukraine (№ 2026-14, 05.10.2000). <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2026-14>.

25. Pro melioratsiiu zemel [On land development], Law of Ukraine (№ 1389-XIV 14.01.2000). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1389-14#Text>.

26. Pro okhoronu kulturnoi spadshchyny [On the protection of cultural heritage], Law of Ukraine (№ 1805-III 08.06.2000). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14#Text>.

27. Pro pytnu vodu, pytne vodopostachannia ta vodovidvedennia [About drinking water, drinking water supply and drainage], Law of Ukraine (№ 2918-III 10.01.2002). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14#Text>.

28. Pro planuvannia i zabudovu. DBN B.2.2-12:2019 [On planning and development. DBN B.2.2-12:2019]. (2019). <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2019/07/DBN-B22-12-2019.pdf>.

29. Pro poriadok vyznachennia rozmiriv i mezh vodookhoronnykh zon ta rezhym vedennia hospodarskoi diialnosti v nykh [On the procedure for determining the size and boundaries of water protection zones and the mode of economic activity in them], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 486 08.05.1996). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/486-96-%D0%BF#Text>.

30. Pro pravovyi rezhym zon sanitarnoi okhorony vodnykh ob'ektiv [About the legal regime of zones of sanitary protection of water bodies], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (№ 2024 18.12.1998). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2024-98-%D0%BF#Text>.

31. Pro pryrodno-zapovidnyi fond Ukrainy [On the Nature Reserve Fund of Ukraine], Law of Ukraine (№ 2456-XII, 16.06.1992). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#Text>.

32. Pro rehuliuвання mistobudivnoi diialnosti [On regulation of urban planning activities], Law of Ukraine (№ 3038-VI, 17.02.2011). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>.

33. Pro rynek elektrychnoi enerhii [About the electricity market], Law of Ukraine (№ 2019-VIII 13.04.2017). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>.

34. Pro topografo-heodezychnu i kartografichnu diialnist [About topographical, geodetic and cartographic activity], Law of Ukraine (№ 353-XIV 23.12.1998). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.

35. Pro transport [On transport], Law of Ukraine (№ 232/94-VR, 10.11.1994). <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80>.

36. Pro truboproviznyi transport [On pipeline transport], Law of Ukraine (№ 192/96-VR, 15.05.1996). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/192/96-%D0%B2%D1%80>.

37. Sklad ta zmist naukovo-proektnoi dokumentatsii shchodo vyznachennia mezh i rezhymiv vykorystannia zon okhorony pamiatok arkhitektury ta mistobuduvannia. DSTU B 5.2.2-10:2016 [The composition and content of the scientific and project documentation regarding the definition of boundaries and modes of use of areas of protection of architectural monuments and urban planning. DSTU B 5.2.2-10:2016]. (2019). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65083.

Отримано 07.02.2024

Olga Petrakovska¹, Mariia Mykhalova²

¹ 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. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9437-9730>

Scopus Author ID: [57208029712](https://orcid.org/0000-0002-9437-9730). **ResearcherID:** [AAC-8135-2019](https://orcid.org/0000-0002-9437-9730)

² 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. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9437-5507>

Scopus Author ID: [57245147600](https://orcid.org/0000-0002-9437-5507). **ResearcherID:** [U-7863-2017](https://orcid.org/0000-0002-9437-5507)

STRUCTURING OF TERRITORIAL ZONES FROM THE POINT OF VIEW OF ESTABLISHING LIMITATIONS ON LAND USE

Land resources are the spatial basis for settlement and economic activity, placement of objects and their use as the main means of production in the economy. One of the key tasks in determining the legitimacy of possible directions of land use is the identification of objects in the information system. Ensuring the long-term socio-economic growth of the country as a whole, regions and settlements and the rational use of natural resources in general and land resources in particular are important tasks today. One of the methods of ensuring the balanced development of territories and the land use of different categories is the formation of restrictions on certain types of activities. The article discusses the methodological approach to one of the stages of the restrictions formation – the identification of the object of the state land cadastre. There is no justification and explanation of the methodological approaches to the division of territorial zones provided in the legislation, which complicates its perception and understanding. The study analyzed the correctness of the names of territorial zones (groups of objects) and their content, the purpose of their establishment in accordance with the legally defined restrictions for registration in the state land cadastre. In the process of research, methods of analysis and synthesis were used. The conducted research made it possible to structure the legally defined zones and combine them into two aggregated groups: the object specified in the name is not related to the imposition of land use restrictions; the objects indicated in the title are the basis or prerequisite for the imposition of restrictions. The results of the study illustrate the need to improve the conceptual apparatus regarding the names of territorial zones; regulate the territorial zones by which the mandatory imposition of restrictions is determined.

The article is scientific and methodical.

Keywords: territorial zone; state land cadastre; land use restrictions; account number; registration.

Table: 1. **References:** 37.

Євгеній Сахно¹, Юлія Щербак², Світлана Коваленко³, Арістідіс Хрістодулопулос⁴

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: evsakhno@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>

ResearcherID: [M-3987-2016](https://orcid.org/0000-0002-9789-7242), SCOPUS Author ID: [57190493489](https://orcid.org/0000-0002-9789-7242)

²викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: Shch.Yu15@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>, ResearcherID: [H-4199-2016](https://orcid.org/0000-0002-3439-3792)

³кандидат педагогічних наук, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: svkoval70@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5829-7132>, ResearcherID: [H-4476-2016](https://orcid.org/0000-0001-5829-7132)

⁴магістрант кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: for_family_and_me@ukr.net

ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТІВ ТА ДЕШИФРУВАННЯ ЗНІМКІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

У науковій статті представлені дослідження інтеграції систем визначення координат об'єктів та дешифрування знімків дистанційного зондування землі, які тісно пов'язані з підвищенням точності позиціонування, дешифруванням отриманих знімків та достовірності отриманих навігаційних даних. Крім того, в роботі розглянуто можливості використання сучасного програмного комплексу Digitals для дешифрування космічних знімків, який є найбільш простим у використанні та є спеціалізованим для дешифрування, збору і аналізу даних на забудованих територіях. Також наведено приклади вихідного та дешифрованого растра. Виконані дослідження дозволили отримати координати досліджуваного об'єкту при взаємодії програмних комплексів Google Earth та QGIS з Digitals, що дало змогу скоротити час на розпізнавання отриманих знімків, та складання проєктів землекористування та кадастру. Використання інтегрованих пакетів, хоча із деякими обмеженнями, проте дає змогу автоматизувати дану технологію і пришвидшити отримання результату.

Ключові слова: інтеграція; координати об'єкта; дешифрування знімків; навігація; радіонавігаційні системи; тривимірні моделі; інформаційні шари; навігаційні координати; метадані.

Рис.: 2. Бібл.: 7.

Актуальність теми. Проблема застосування глобальних систем супутникової навігації для визначення координат є актуальною та перспективною в області моніторингу місцезонашування об'єктів. На даний час навігаційні системи мають досить широкий спектр застосування практично у всіх галузях господарства України. Розвиток та розповсюдження сучасних систем супутникового моніторингу та визначення координат досліджуваного об'єкта тісно пов'язані із підвищенням точності позиціонування, дешифруванням отриманих знімків та достовірності отриманих навігаційних даних. Особливо ці проблеми стають актуальними під час широкого застосування сервісів з використанням GPS-трекінгу, завданням яких є відстеження маршрутів руху об'єктів з метою визначення їх координат в режимі реального часу. Однак через похибки, зумовлені відомими причинами, такими як: втрата сигналу від супутника, зміна геометрії його розташування, відбиття сигналів, системних похибок, кінцевий результат не відповідає дійсності.

Постановка проблеми. Загальновідомо, що з плином часу й розвитком технологій процес дешифрування набуває дедалі більшої важливості і ділової активності. Доступ до цифрових знімків як супутникових, так і зроблених БПЛА робить цю галузь все більш комерціалізованою та доступною для громадського сектору економіки, що стає новою основою побудови сучасного господарського комплексу. Тому інтеграція інформаційних систем визначення координат з дешифруванням знімків стає більш надійною, доступною і гарно розвинутою технологією. Отримання зображень та зручність передачі знімків через мережу Інтернет, наявність великої кількості сайтів з доступом до цих знімків, схем, планів або карт робить можливість легко пристосовуватись до умов знімання і знаходити необхідні матеріали для вирішення поставлених завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Так в роботах [1; 2] розглянуто аспекти використання сучасних супутникових технологій під час топографо-геодезичних робіт з координування точок місцевості. Особлива увага звернута на питання технології виконання польових вимірювань і процесів оброблення GPS-спостережень та використання

референтних систем координат і додаткової інформації. Також проведено порівняльний аналіз обробки супутникових спостережень на пунктах геодезичної мережі з використанням програмного забезпечення від різних виробників. У роботі [3] показано, що основний зміст навігаційної задачі супутникових радіонавігаційних системах є визначення просторових координат контрольованого об'єкта, складових векторів його швидкості та прискорення, а також часу. Проаналізовано методи вимірювання координат та параметрів руху об'єктів з використанням супутникових радіонавігаційних систем; визначено їх основні переваги та недоліки. З'ясовано та проаналізовано складові оцінки швидкості при застосуванні різновидів доплерівського та псевдодоплерівського методів. У статті [4] наведено теоретичні розрахунки перетворених формул космічної геодезії для отримання координат недоступної точки за трьома вихідними пунктами та вимірними відстанями. Проведено апробацію методу на еталонному базисі другого розряду, розраховано оптимальні довжини базового вектора для досягнення найвищої точності отримання координат недоступної точки. Запрограмовано ітераційний процес визначення координат у програмному забезпеченні MS Excel. Стаття [5] присвячена аналізу процесу виявлення та розпізнавання об'єктів за даними космічної зйомки, при цьому технологію військового дешифрування представлено чотирма рівнями, які зумовлені прямими та зворотними зв'язками між собою і утворюють декілька локальних систем. Оскільки переважна більшість часу на проведення дешифрування витрачається на етапі розпізнавання простих об'єктів, підвищити його оперативність запропоновано за рахунок автоматизації процесу виявлення та розпізнавання шляхом використання зображень моделей об'єктів як еталона. У роботі [6] наведено теоретично обґрунтовану методика, що пропонується для практичного використання в установах і організаціях, що користуються даними дистанційного зондування Землі. Методика заснована на оцінюванні фізичних параметрів знімка: детальності, контрасту, масштабу зображення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Визначення координат досліджуваного об'єкта з наступним дешифруванням космічних знімків заданого району є сучасною технологією, яка включає в себе супутникове обладнання, програмне забезпечення, методику виконання робіт, а також аналіз і оформлення отриманих даних. Тому розробка методики визначення координат об'єктів, що рухаються за допомогою сервісу Google Earth, з дешифруванням космічних знімків за допомогою сучасного програмного забезпечення є досить складною та актуальною задачею. В межах питань, що вирішуються необхідно визначення технічних критеріїв вибору вихідних даних для процесу дешифрування з використанням програмного комплексу Digital, та надання методичних рекомендацій щодо впровадження даної інформаційної технології. Також необхідно дослідити методи використання програмного комплексу для роботи із супутниковими знімками та розглянути можливість використання програмного забезпечення QGIS для процесу дешифрування.

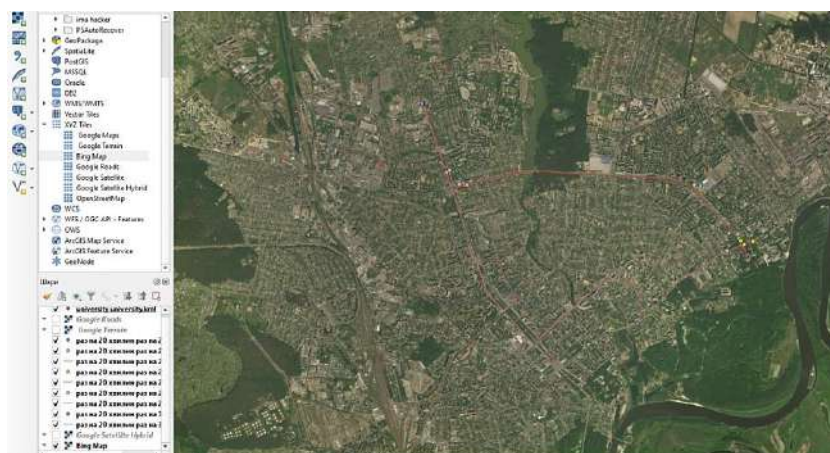
Мета статті. Метою цієї статті є аналіз та проектування сучасних інформаційних технологій, визначення координат досліджуваного об'єкта та дешифрування космічних знімків для складання плану навігації району.

Результати досліджень. Для визначення координат досліджуваного об'єкта на рівні з існуючою системою *Google Maps* рекомендовано використовувати ГІС *Google Earth* [7] яка надає користувачеві додаткові можливості створювати тривимірні моделі Земної поверхні, на основі сучасних супутникових знімків, аерофотозйомок та отриманих географічних даних. За допомогою сервісу *Google Earth* користувачі програмного забезпечення мають можливість переглядати панорамні знімки, наземні фотографії та 3D-моделі обраної місцевості з усього світу. Користувач може проводити дослідження різних регіонів, міст, визначати маршрути руху та орієнтуватися за допомогою компаса. Крім описаних функцій, *Google Earth* надає вільний доступ до додаткових інформаційних шарів, таких як полігони адміністративного поділу, місця відпочинку, відомі будівлі, річки, озера та інші об'єкти.

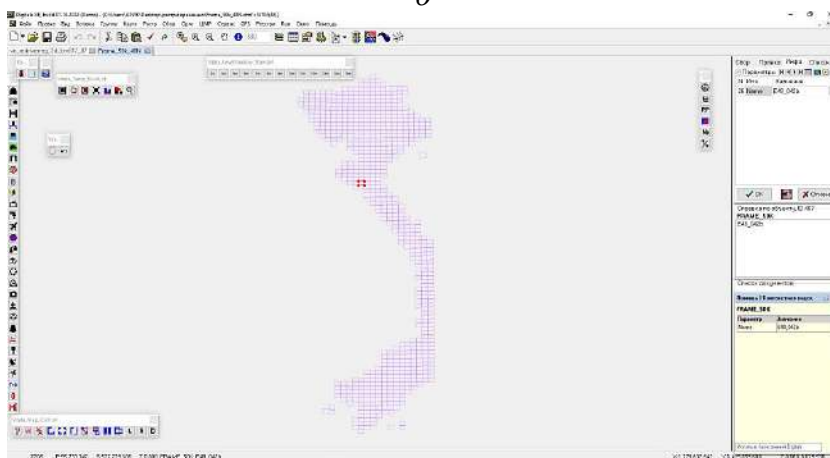
Особливою перевагою програмного комплексу є можливість для модального дешифрування отриманих знімків в існуючих системах, наприклад таких як Digitala та QGIS. Процес визначення і збереження координат заданих об'єктів, як і їх взаємодія, розширюють можливості при роботі з інтегрованою інформаційною системою, що є додатковою важливою функцією використання програмного забезпечення. Так на рис. 1 показано результати зв'язку та інтеграції між Google Earth та QGIS і Digitala, оскільки при рішенні задач щодо визначення координат керованого об'єкта ставилася задача отримання карти навігації обраного району досліджень.



а



б



в

Рис. 1. Приклад взаємодії програмних комплексів:
а – Google Earth з Digitala; б – QGIS з Digitala; в – визначення растра

Інтерактивність параметрів з заданими місцями об'єктів та прокладання маршрутів руху є досить сучасною навігаційною системою, що має цілий комплекс технічних даних, які отримано при дешифруванні космічних знімків та при визначенні і збереженні координат окремих об'єктів, які рухаються в часі. Таким чином, ця ГІС стає простим та універсальним інструментом отримання навігаційних координат в процесі дистанційного зондування земної поверхні.

Вибір вихідних даних є важливою частиною підготовчого процесу, адже наявність правильно визначених матеріалів грає визначну роль у подальших процесах дешифрування космічних знімків. Найкращим прикладом таких додаткових відомостей є коефіцієнт тіні супутника. Цей коефіцієнт дозволяє за допомогою окремого плагіну визначити в полегшеному вигляді визначити висоту будівлі за її тінню. Визначення за довжиною тіні з коефіцієнтом тіні робить процес отримання висоти набагато точнішим, ніж аналогічне за допомогою власного бачення і розуміння висотності регіону. Вибір вихідних даних залежить і від конкретної задачі та типу зображення, яке необхідно обробити. Основним і найпоширенішим джерелом є космічні знімки, які можуть перебувати у форматі tif. або jpeg. Також вони можуть перебувати в інших, більш спеціалізованих форматах.

При обробці космічних знімків важливо мати доступ до метаданих, які містять інформацію про характеристику знімку, географічні координати, час і дату зйомки, висоту, на якій знаходився супутник, спектральні характеристики, зазначений коефіцієнт тіні і т. ін. Також параметри можуть бути представлені як у ГІС форматах, так і в текстових файлах. Для точного дешифрування космічних знімків також можуть знадобитися калібровані дані, які використовуються для виправлення вимірів і перетворення сигналів з сенсорів супутника у фізичні одиниці. Ці дані можуть містити інформацію про характеристики супутникових сенсорів, референтні значення або коефіцієнти корекції. Залежно від конкретної задачі можливо використовувати додаткові дані, такі як мапи, інформацію про класифікацію земної поверхні, метеорологічні дані, раніше оброблені знімки тощо. Ці дані можуть бути у форматі файлів або доступні через вебсервіси.

Виправлення недоліків у зображенні здійснюється за допомогою методів просторової фільтрації з застосуванням перетворення в ковзному вікні. При цьому перетворенні значення яскравості кожного пікселя в зображенні перераховуються. Це виконується шляхом переміщення вікна, яке переміщується по знімку, і обчислення нового значення для центрального пікселя вікна на основі значень пікселів, що його оточують. Цю операцію застосовують до кожного центрального пікселя вікна. Розмір вікна може бути, наприклад, 3×3 або 5×5 пікселів. Вагові коефіцієнти для пікселів встановлюються дослідником залежно від поставлених цілей дешифрування. У математиці цю операцію називають згорткою, а матрицю, яка використовується як «ковзне вікно» - ядром згортки. Процес фільтрації знімків належить до зміни просторових і спектральних характеристик об'єктів з метою поліпшення зображення, тому матричну функцію (ядро згортки), яка застосовується в "ковзному вікні", можна отримати з формули:

$$B(f) = \frac{\sum_{i=1}^q (\sum_{j=1}^q f_{ij} B_{ij})}{F},$$

де $B(f)$ – значення пікселя перетвореного зображення (результат фільтрації); f_{ij} – числові значення коефіцієнтів фільтра, розміщені в i -тому рядку і в j -й колонці матриці; B_{ij} – значення пікселя початкового зображення в межах ковзного вікна, що відповідає f_{ij} ; q – розмір фільтра, визначальний розмір боку «ковзного вікна»; F – величина, що залежить від типу операції фільтрації і дорівнює або сумі фільтра, або 1, якщо сума коефіцієнтів дорівнює 0.

Наступною стадією процесу дешифрування є отримання зони відповідальності, яка обмежується рамками вікна, і яку необхідно дешифрувати. Це відбувається за допомогою різного додаткового програмного забезпечення, особисто автори користуються про-

грамним забезпеченням Total Commander. Після отримання за допомогою окремого каталогу схем по поясах планети визначається номер необхідного растру. Растр зазвичай являє собою супутниковий знімок, який є в доступі в компанії або у відкритому доступі. Є також додаткові растри та знімки, які можуть бути як супутниковими знімками, так і аерофотознімками.

Для подальших досліджень будемо використовувати досить популярне на даний час програмне забезпечення вітчизняної розробки DigitalS. Цей програмний пакет є найбільш простий і спеціалізований для дешифрування, збору й аналізу даних на забудованих територіях. Сам збір відбувається за ортогональними проєкціями, точки якої повинні мати деяку визначену відстань, яка відповідає типу замовлення. Також певна дистанція підтримується між об'єктами, що вимагається для підтримання геометрії самого програмного забезпечення та може також бути встановлена відповідно до типу замовлення (рис. 2). Після виконання збору даних повинно відбуватись виконання перевірок, які необхідні для визначення правильності геометрії, виконання необхідних умов за типом замовлення (мінімальна площа будівлі), виключення неортогональних об'єктів, видалення зайвих чи допоміжних об'єктів, перевірка коректності вузлів об'єктів [7]. Після завершення перевірок відбувається аналіз, що включає в себе помічення особливих об'єктів таких як релігійні споруди, труби ТУЦ/ТЕС, туристичні пам'ятки тощо, а також простановлення висот будівель (рис. 2, б). Висоти виставляються завжди для унікальних споруд, і якщо в замовленні необхідно, то відбувається виставлення висот усіх будівель. Виставлення висот часто супроводжується використанням додаткових даних, які можна отримати в GoogleMaps і GoogleEarth, а також спростити визначення висоти за допомогою тіні і плагіну та коефіцієнта тіні супутника, який не завжди є доступним.

*a**б*

*Рис. 2. Дешифрування знімків:
а – вихідний растр; б – дешифрований растр*

Подібна робота для застосування в навігації, складанні плану містобудування та міському кадастрі дає змогу більш раціонально та адекватно використовувати доступні ресурси. Висока важливість подібних даних та невисока ціна їх отримання робить популярними подібні замовлення в країнах, що розвиваються та мають високу щільність населення. Це також зумовлює необхідність адаптування до місцевого ландшафту, що часто відбувається за допомогою додаткових матеріалів.

Висновки. На основі вищезазначеного можна стверджувати, що розвиток розглянутої галузі продовжиться і далі. Велика кількість специфічних програмних пакетів може свідчити про те, що відбувається поступовий розподіл обов'язків між спеціалістами, які використовують різне програмне забезпечення для дешифрування знімків дистанційного зондування землі.

Використання інтегрованих пакетів дає змогу автоматизації даної технології, хоча із деякими обмеженнями. З урахуванням інтеграції інформаційних систем у найближчому майбутньому можна очікувати на розробку та розвиток таких систем:

- супутники з високою роздільною здатністю та покриттям, а також з меншими габаритами. Це збільшить можливості детального дослідження невеликих територій та спостереження за раніше недоступними об'єктами;
- розвиток гіперспектральних знімків, які дадуть можливість отримання інформації про електромагнітне випромінювання в багатьох вузьких спектральних діапазонах;
- запуск супутників-констеляцій, такі як Starlink від SpaceX, які створять можливість більшого покриття та збільшення частоти оновлення зображень. Це збільшить точні та швидкість дешифрування;
- поєднання космічних знімків з іншими технологіями, такими як дрони, БПЛА, датчики Iot та інші. Це відкриває можливість створення інтегрованих систем моніторингу планети.

Означені перспективи можуть привести до значного розширення галузей застосування космічних знімків, поліпшення точності та ефективності їх дешифрування та відкриття нових сфер для вивчення та моніторингу земної поверхні..

Список використаних джерел

1. Савчук, С. Г. Проблемні питання під час використання сучасних супутникових технологій визначення координат [Електронний ресурс] / С. Г. Савчук. – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1732/gka69200704.pdf>.
2. Бухальська, Т. В. Порівняльний аналіз опрацювання GNSS-спостережень різними програмними пакетами / Т. В. Бухальська // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2011. – Вип. 2 (54). – С. 221-228.
3. Рудик, А. В. Методи вимірювання координат та параметрів руху об'єктів з використанням супутникових радіонавігаційних систем / А. В. Рудик // Вісник Інженерної академії України. – 2015. – № 4. – С. 51-56.
4. Віват, А. Й. Спосіб визначення точного положення об'єкта з літаючої платформи / А. Й. Віват, І. Ф. Рій, О. І. Бочко // Економіка і суспільство. – 2017. – Вип. № 9. – С. 809-812.
5. Лавренчук, О. В. Аналіз технології дешифрування космічних знімків / О. В. Лаврінчук, С. В. Гринюк, М. Ю. Ракушев // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2017. – № 3. – С. 45-49.
6. Горшенін, О. Є. Методика оцінювання якості космічних знімків при їх використанні для дешифрування штучних об'єктів дистанційного зондування землі / О. Є. Горшенін, В. В. Петрожалко, О. Ф. Дубина // Вісник ЖДТУ. – 2011. – № 1 (56). – С. 37-43.
7. Хрістодулопулос, А. Використання технології дешифрування космічних знімків для складання карти навігації району / А. Хрістодулопулос // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : Всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспір. та молод. учен. (м. Чернігів, 19-20 квіт. 2023 р.) : зб. тез доп. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – С. 297.

References

1. Savchuk, S.H. (2007). *Problemnii pytannia pid chas vykorystannia suchasnykh suputnykovykh tekhnolohii vyznachennia koordynat [Problematic issues when using modern satellite technologies for determining coordinates]*. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1732/gka69200704.pdf>.

2. Bukhalska, T.V. (2011). Porivnialnyi analiz opratsiuvannya GNSS-sposterezhen riznyimi prohramnymi paketamy [Comparative analysis of the processing of GNSS observations by different software packages]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya – Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management*, 2(54), 221-228.

3. Rudyk, A.V. (2015). Methods of measuring coordinates and movement parameters of objects using satellite radio navigation systems [Metody vymiryuvannya koordynat ta parametriv rukhu ob'ektiv z vykorystanniam suputnykovykh radionavihatsiinykh system]. *Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 4, 51-56.

4. Vivat, A.I., Rii, I.F., Bochko, O.I. (2017). Sposib vyznachennia tochnoho polozhennia ob'ekta z litaiuchoi platformy [A method of determining the exact position of an object from a flying platform]. *Ekonomika i suspilstvo – Economy and society*, 9, 809-812.

5. Lavrenchuk, O.V., Hryniuk, S.V., Rakushev, M.Iu. (2017). Analiz tekhnolohii deshyfruvannya kosmichnykh znimkiv [Analysis of the technology of decoding space images]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony – Modern information technologies in the field of security and defense*, 3, 45-49.

6. Horshenin, O.Ie., Petrozhalko, V.V., Dubyna, O.F. (2011). Metodyka otsiniuvannya yakosti kosmichnykh znimkiv pry yikh vykorystanni dlia deshyfruvannya shtuchnykh ob'ektiv dystantsiinoho zonduvannya zemli [Methodology for assessing the quality of space images when they are used for deciphering artificial objects of remote sensing of the earth]. *Visnyk ZhDTU – Bulletin of ZHTU*, 1(56), 37-43.

7. Khristodulopulos, A. (2023). Vykorystannia tekhnolohii deshyfruvannya kosmichnykh znimkiv dlia skladannia karty navihatsii raionu [Using the technology of deciphering space images to compile a navigation map of the district]. *Novitni tekhnolohii u naukovii diia-lnosti i navchalnomu protsesi : Vseukr. nauk.-prakt. konf. – New technologies in scientific activity and the educational process : Proceedings of All-Ukrainian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists (Chernihiv, p. 297). NU "Chernihiv Polytechnic"*.

Отримано 05.03.2024

UDC 528.77

Yevgeniy Sakhno¹, Yulia Shcherbak², Svitlana Kovalenko³, Aristidis Christodouloupolos⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: evsakhno@ukr.net . **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>

Researcher ID: [M-3987-2016](https://orcid.org/0000-0002-9789-7242). **SCOPUS Author ID:** [57190493489](https://orcid.org/0000-0002-9789-7242)

² lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: Shch.Yu15@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>. **Researcher ID:** [H-4199-2016](https://orcid.org/0000-0002-3439-3792)

³ PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor of Department of Geodesy, Cartography and Land Planning,
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: svkoval70@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5829-7132>. **Researcher ID:** [H-4476-2016](https://orcid.org/0000-0001-5829-7132)

⁴ Graduate Student of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: for_family_and_me@ukr.net

INTEGRATION OF SYSTEMS FOR DETERMINING THE COORDINATES OF OBJECTS AND DEFINITION OF REMOTE EARTH SENSING PICTURES

The problem of using global satellite navigation systems to determine coordinates is an actual and promising task in the field of object location monitoring. Currently, navigation systems have a fairly wide range of applications in almost all branches of the economy of Ukraine. The development and distribution of modern satellite monitoring systems and determining the coordinates of the object under study are closely related to increasing the accuracy of positioning, deciphering the received images, and the reliability of obtaining navigation data.

To solve the problems, it is recommended to use technologies of software decoding of space images with simultaneous integration of the latter with complexes for determining the coordinates of the selected object. Access to digital images, both satellite and drone, makes this process more and more commercialized and accessible to the public sector of the economy, which becomes the basis for the construction of the latest modern geosystemic space.

The analysis of research and publications in the field of integration of systems for determining the coordinates of objects and deciphering images of remote sensing of the earth showed that these issues are currently not given enough attention in the scientific literature, therefore this direction of scientific research is the basis of modern geoinformation systems.

The purpose of the scientific work is the analysis and design of modern information technologies for determining the coordinates of the researched object and deciphering space images for drawing up a navigation plan of the district.

The conducted research made it possible to obtain the coordinates of my object under the interaction of Google Earth and QGIS software complexes with Digitals, which will allow us to reduce the time of recognition of the received images, and the preparation of land use and cadastre projects.

The field considered in the article has trends for further development, as it can contribute to more detailed research of small areas and observations of previously inaccessible objects, will allow obtaining data on electromagnetic radiation in some narrow spectral ranges, will increase the accuracy and speed of image decoding, and will become the basis for the creation of integrated systems for monitoring the planet.

Key words: *integration; object coordinates; image decoding; navigation; radio navigation systems; three-dimensional models; information layers; navigation coordinates; metadata.*

Fig.: 2. References: 7.

Andrii Brydun¹, Andrii Sohor², Mykhailo Fys³, Yurii Hubar⁴

¹PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: andrii.m.brydun@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5634-0512>

ResearcherID: AAC-1271-2020. **Scopus Author ID:** 57212560353

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>.

ResearcherID: ABI-6288-2020. **Scopus Author ID:** 57224950613

³Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: mykhailo.m.fys@lpnu.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8956-2293>

ResearcherID: AAB-9528-2020. **Scopus Author ID:** 36091174500

⁴Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Cadastre of Territory
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: yurii.p.hubar@lpnu.ua **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2538-0727>

ResearcherID: ABZ-0251-2022. **Scopus Author ID:** 57224950139

WEB MAPPING OF SURFACE WATER POLLUTION IN LVIV REGION BY MEANS OF GIS AND REMOTE SENSING

The ecological state of surface waters in Lviv region is affected by various factors: soil and air pollution, technogenic load on the territory, inefficient operation of sewage treatment plants in settlements, pollution and littering of rivers with household and other waste. Another important problem leading to surface water pollution in the region is the absence of water protection zones and coastal protective strips. The lack of cartographic materials and the undefined boundaries of water protection zones and coastal protection strips result in violations of land and water legislation. Currently, the state of water bodies in Lviv region is unsatisfactory. The main problems in this area lie in the growing negative impact on the environment and human health. The main purpose of this paper is to create a web map of surface water pollution in Lviv region, in particular, using remote sensing data.

To this end, we have collected and systematized geospatial statistical cartographic materials on the ecological state of surface waters. In addition to statistical data, remote sensing (RS) data obtained from various sources have been used to assess the state of surface waters. The necessary software for the development of such a web map has been identified. An algorithm for uploading geospatial data to the created web resource has been developed. Thus, the web maps of surface water pollution in Lviv region have been created in ArcGIS Online, a software environment.

Keywords: *geospatial data; GIS; remote sensing; ecological cartography; surface water pollution; interactive map.*

Fig.: 4. References: 25.

Introduction. As a result of long-term operation without the necessary maintenance of water supply and sewerage systems, most of the water supply and sewerage facilities in Lviv region are in unsatisfactory technical condition, with some of them being in the abnormal one. The situation is being worsened by the discharge of untreated and insufficiently treated municipal and industrial wastewater, due to physical deterioration and functional depreciation of sewage treatment facilities and lack of funds for construction.

Over 1.5 million tons of sewage have accumulated on the sludge fields near the treatment facilities of the city of Lviv, which are operated by Lvivvodokanal, a municipally owned enterprise. The sites with a total area of 22 hectares are daily replenished with 3 thousand m³ of sludge, which leads to the aggravation of the environmental situation and violation of the technological regime. Lvivvodokanal belongs to the business entities included in the "List of 100 objects that are the largest environmental polluters in Ukraine" [1; 2].

To date, water zones and coastal strips of water in the territory of Lviv region have not been demarcated, which violates the favorable environmental protection regime of water bodies and leads to their pollution and contamination. Given the state of pollution of surface water bodies, the priority issues are the expansion of sludge sites, sludge disposal, and wastewater disinfection at

sewage treatment plants (STP) in Lviv; construction of sewage treatment plants for the urban settlement of Slavske and for the cities of Rava-Ruska, Morshyn, construction of a collector sewer in Bryukhovychi, STPs in Chervonohrad, Dobromyl, Bibrka, Zhydachiv and Novoyavorivsk [3].

Review of recent scientific publications. The analysis of modern scientific publications showed that considerable attention should be paid to the problem of surface water pollution. If such a problem exists in the future, it will have negative consequences for the environment. Ecological mapping is the only way to visually display the ecological quality of surface waters. The issues in question have been addressed by a number of scientists [4; 5].

It should be noted that ecological mapping is a rather specific type of thematic mapping, since it is difficult to determine the subject area of the studied value. Such research is characterized by the uniqueness of each ecological system, the extent of human influence on the environment, the implementation of nature protection measures, as well as the relationships of different populations with each other and with the environment, which has been studied by the following scientists [6; 7].

The purpose of ecological mapping is the ability to analyze the ecological situation and its change over time, that is, to identify spatial and temporal changes in environmental components that affect the state of the ecosystem. To achieve this goal, it is necessary to collect and analyze environmental information, evaluate it, give it a territorial interpretation, as well as create a cartographic presentation of very diverse information on environmental pollution. These problems have been investigated by a number of researchers [8-10].

The legal and organizational principles of environmental impact assessment are aimed at preventing damage to the environment, ensuring ecological safety, environmental protection, rational use and reproduction of natural resources in the process of making decisions about the implementation of economic activities that may have a significant impact on the environment, taking into account state, public and private interests. This method of researching natural and man-made objects and taking into account environmental information determine the importance and necessity of using modern geographical methodologies using remote sensing data [11-25].

Unsolved aspects of the problem. The purpose of the paper. Water resources of the Lviv region play an important role for the population and economy. Water is used for drinking, technical, agricultural needs, in fisheries, for medical purposes, is a source of replenishment of underground water reserves, etc. The surface waters of Lviv Oblast are represented by rivers, reservoirs, lakes and ponds. According to the preliminary summarized data for the year 2021 of the state accounting of water use by types of economic activity and by administrative districts of the Lviv region, summarized information is provided on the withdrawal, discharge and irreversible use of water, the use of water for economic and domestic needs.

Priority areas in 2021 were the construction, reconstruction and capital repair of hydro-technical structures, protective flood dams, shore fortification structures, clearing and regulation of rivers.

The purpose of the paper. The purpose of this article is an ecological study of the quality of surface water in the Lviv region and the creation of an interactive map based on these data in the ArcGIS Online software environment.

To achieve this goal, the work set and resolved:

- collection and systematization of statistical cartographic and remote sensing materials concerning the ecological state of surface waters in Lviv region.
- determination of the GIS software required for the development of an interactive surface water pollution map of the Lviv region.
- introduction of the algorithm of surface water pollution data of the Lviv region into the created web resource by means of GIS.

Main body. The assessment of surface water quality was based on the analysis of the values of hydrochemical indicators in comparison with the corresponding values of their threshold limit concentrations (TLC) and background indicators (Table 1).

Table 1 – Threshold limit values (TLV) of hydrochemical indicators

Hydrochemical indicator (mg/dm ³)	Threshold limit values	
	For water bodies of fishery purpose	For water bodies of household use
Dissolved oxygen	–	>4.0
The pH value	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
Sum of ions	1000	–
Chlorides	300	350
Sulfates	100	500
Magnesium ions	40	–
Calcium ions	180	–
Sodium ions	120	200
Ammonium nitrogen	0.39	2.0
Nitrate nitrogen	9.0	10.0
Nitrite nitrogen	0.02	1.0
Phosphates	0.17	3.5
Zinc	0.01	1.0
Manganese	0.01	0.1
Chromium (VI)	0.001	0.05
Lead	0.1	0.03
Nickel	0.01	0.1
Cadmium	0.005	0.001
Total iron	0.1	0.3
Petroleum products	0.05	0.3
Phenols	0.001	0.001

Hydrochemical and hydrophysical indicators were divided into the following groups according to their type and/or quantitative characteristics [2]:

Group 1 - components of salt composition: (total ions, bicarbonates, chlorides, sulfates, magnesium, calcium, sodium ions)

Group 2 - indicators of tropho-saprobiological state: suspended solids, dissolved oxygen, pH, dissolved organic matter, compounds of the main biogenic elements (ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen, phosphates);

Group 3 - specific substances: oil products, phenols; heavy metals (total iron, zinc, total chromium, lead, nickel, cadmium).

Lvivvodokanal has implemented the "Lviv Water Supply and Wastewater Treatment Project", which is funded by a World Bank loan, a grant from the Swedish government and the city budget [1]. Other measures are being taken to reduce the negative impact of the facility on the environment. The amount of pollutants discharged into the Poltva River after the sewage treatment facilities of the city of Lviv according to Lvivvodokanal is shown in Table 2.

Table 2 – Amount of pollutants discharged into the Poltva River

Pollutants	1 production line		2 production line	
	2021 yr. (t)	2020 yr. (t)	2021 yr. (t)	2020 yr. (t)
Suspended solids	435.55	572.13	1075.0	1039.44
Mineralization	11378.92	14462.54	26485.0	24969.13
Sulfates	1872.57	2940.64	3544.06	3785.36
Chlorides	3446.93	4444.38	7742.12	7440.48
Ammonium nitrogen	55.78	74.25	127.85	124.25
Nitrates	159.66	208.52	823.64	751.77
Nitrites	19.7	16.06	19.78	19.18
Phosphates	41.29	51.68	96.26	87.03
Iron	9.64	13.19	17.5	17.1

According to Lvivvodokanal, the comparison of the amount of wastewater discharged into the Poltva River from the sewage treatment plants of Lviv in 2021 to the amount in 2020 is shown in Table 3.

Table 3 – Amount of wastewater discharged into the Poltva River after sewage treatment plants

	2021 yr.	2020 yr.
1 production line	29 700 815 m ³	38 962 377 m ³
2 production line	78 723 753 m ³	75 984 646 m ³

Waste management and disposal: sludge after sewage treatment plants (STP) in the city of Lviv in 2021 amounted to 24,247.11 tons (in 2020 - 25,173.10 tons). During 2021, samples were taken from lakes, ponds, streams, and rivers. A total of 37 locations were investigated. The largest number of exceedances was recorded for the following pollutants: suspended solids (32 locations), total iron (16 locations), ammonium nitrogen and ammonia (16 locations), and phosphates (9 locations). According to the results of chemical tests carried out in 2021, the threshold limit concentrations of pollutants from 4 to 7 indicators were exceeded in 9 water bodies [1].

The most polluted water bodies according to the observations are the following: the Kryvchytsky stream (Staroznesenska str. 200); the Zubra river, bridge; the Lysynytsky stream (Trakt-Hlynyansky str. 150); the reservoir on Panas Sotnyk str.; the "Poltva" river (a bypass road), "Vse dlia Fur" store; the river "Myklasivka" (a bypass road); the stream "Vodyanii" near the Think Global School (Airport, behind the garages); the "Bilohorsky" stream (a bypass road), the village of Rudno (from the side of Sygnivka). In the water of most of these bodies, the threshold limit concentrations of suspended solids, total iron, ammonium nitrogen, and phosphates were recorded. Instead, the purest in terms of 1 exceedance of maximum permissible concentrations of pollutants in the Q1 were the following water bodies: the reservoir in "Levandivske Lake" park; the reservoir at Kulparkivska, 139 (Symonenko); Vakhnyanina str. 29 (Creativity Center of Children and Youth of Galicia); the "Betonka" reservoir on Antonycha str., the reservoir at Zamarstynivska-Naukova; the stream in the village of Pidryasne (at the junction); the stream near the Hrybovychi landfill (near the road); the river "Mlynivka" in Hryada (in front of the pig farm, bridge sign in front of the village Doroshiv), the reservoir in Dubliany (Shevchenko str., the final bus stop); the water body at Lypynskoho street, 27 (near the monastery); the water body in the village of Volya-Homuletska (the largest in area, the recreation complex "Albatross"); "Snopkivskyi" park, Buchmy str. In general, the following pollutants were detected in Lviv's water bodies: suspended solids, total iron, ammonium nitrogen, nitrates, nitrites, phosphates, chlorides, sulfates, fats, synthetic surfactants, and oil products [2].

According to the results of the monitoring laboratory for environmental pollution of the Volyn Hydrometeorology Center, monitoring observations of the water quality of the Western Bug River basin were carried out in 2021.

Table 4 – Mean concentrations of pollutants in the Western Bug river basin

No	Dam location	pH, pH units	Oxygen, mg /dm ³	Calcium, mg /dm ³	Magnesium, mg /dm ³	Hydrocarbonates, mg /dm ³	Chlorides, mg /dm ³	Sulfates, mg /dm ³	Sodium, mg /dm ³	Bicarbonate. oxid. mg/dm ³	N (ammon.), mg N/dm ³	N (nitrite), mg N/dm ³	N (nitrate), mg N/dm ³	P (phosph.), mg P/dm ³	P total.,mg P/dm ³
1	The Western Bug (river), 781 km, Busk town	7.87	9.01	151	12.2	42333	50.4	15.37	3.63	29.2	1.03	0.297	0.13	0.199	0.241
2	The Western Bug (river), 723 km, Staryi Dobrotvir (village)	7.96	10.44	137.3	13.3	393.67	53.23	22.73	11.59	23.93	0.37	0.277	0.03	0.247	0.333
3	The Rata (river), 3.5 km, Mezhyrichchia (village)	7.98	9.41	109.3	9.47	331.67	22.23	21.77	6.77	35.07	0.49	0.065	0.25	0.046	0.070
4	Kyiv Stream 11 km, Nestanychi (village)	7.84	9.89	113	32.3	363	26.47	14.1	4.41	13.13	0.30	0.010	0.57	0.016	0.035
5	the Marunka river in Vynnyky under the bridge of the district road	7.99	11.3	114.3	18.1	478	40.07	37.8	27.4	18.4	1.19	0.084	0.23	0.121	0.204

The analysis of surface water quality is based on observations of the hydrochemical parameters provided by the Volyn Regional Centre for Hydrometeorology. The results of observations on the quality of surface water in the city of Lviv were provided by the municipal enterprise "Administrative and Technical Department" of the Lviv City Council. Data on the amount of pollutants discharged into the Poltva River from sewage treatment plants were provided by Lvivvodokanal.

In addition to statistical data, remote sensing materials obtained from various sources were used to assess the state of surface waters in Lviv region.

It should be noted that the change in water quality at the observation locations depends on the quantity and quality of wastewater from enterprises, unorganized runoff, meteorological factors, hydrological conditions of rivers during water sampling, etc.

Taking into account the above, we used quite a software environment "ArcGIS Online" to compile the web map. To get started in your chosen environment, you need to collect and structure data in Microsoft Office Excel. For our case, three Excel spreadsheets were developed with the following data:

- with data on monitoring of surface waters in Lviv region using remote sensing data.
- with data on recorded exceedances of indicators at enterprises that were investigated by the State Environmental Inspectorate in 2020-2021.
- with data on wastewater discharge from wastewater treatment plants.
- with observational data on the state of surface water pollution on border rivers.

For visualization our data, we used the OpenStreetMap map in the ArcGIS Online software environment with the given boundaries of the Lviv region and the boundaries of the districts of the region.

To begin with, we identified the locations of surface water pollutants and water sampling locations.

To solve the above-mentioned problem, we used the "ArcGIS Online" software environment, indicating the location of each enterprise in Lviv region (Fig. 1).

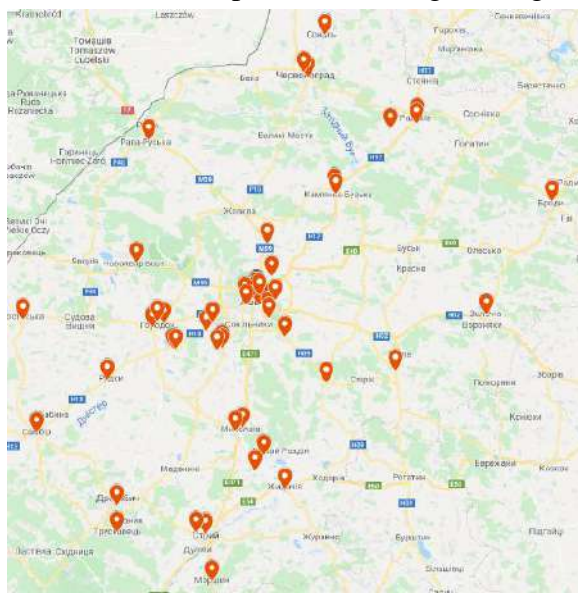


Fig. 1. Map of polluters in Lviv region

Also, the location of sample collection points in the rivers of Lviv region was determined (Fig. 2).

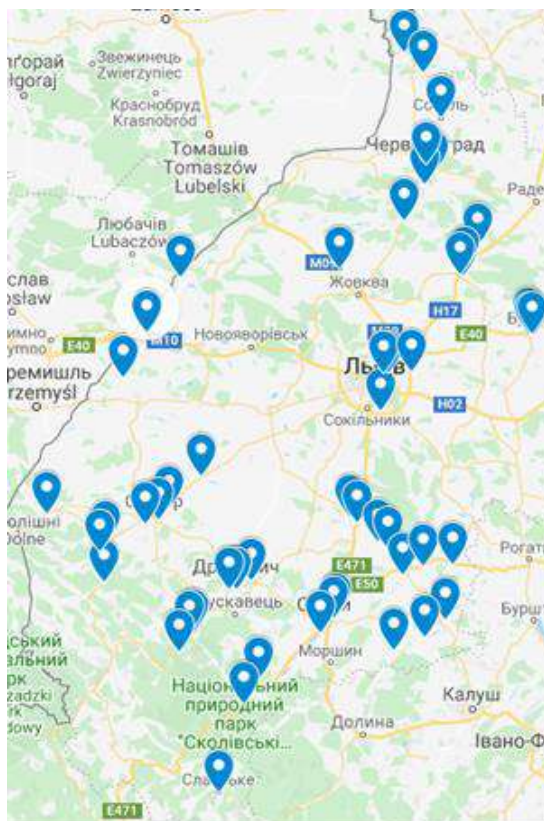


Fig. 2. Map with sample collection points in the rivers of Lviv region

Then, this information was uploaded to ArcGIS Desktop, and a layer with points was exported to KML / KMZ.

After completing these steps, it is necessary to open the ArcGIS Desktop environment, where the layer with the districts of the Lviv region was previously added, where we will use the ArcToolbox / Conversion Tools / From KML / KML to Layer menu to get the downloaded KML file in the ArcGIS software environment.

After that, this downloaded file is exported to the "Shapefile" using the "ArcToolbox" function. To do this, open the "ArcToolbox" function and locate the required KML file, along with enabling "M Values" and "Z Values" by means of the "Environments" function. This data includes M-values and Z-values, which are usually used to store route and altitude data.

After uploading the data into ArcGIS Desktop, it is necessary to select all the rivers where water samples were taken. To do this, the "Select By Attributes" function is used, where the necessary river is selected. The above steps lead to the generation of the following map in the "ArcGis", a software environment.

After compiling the map in the "ArcGIS Desktop", all the data are uploaded to "ArcGIS Online", with all the materials processed in the "Shapefile" being exported to the selected folder and archived.

After completing the process of styling, symbolizing and processing all layers, the map can be made publicly available using the "Share" function. This feature allows you to either insert into an existing site or develop your own program. In this case, we developed our own program.

As a result, we created two different maps:

- Surface water monitoring map of the Lviv region, obtained from remote sensing data (Fig. 3).

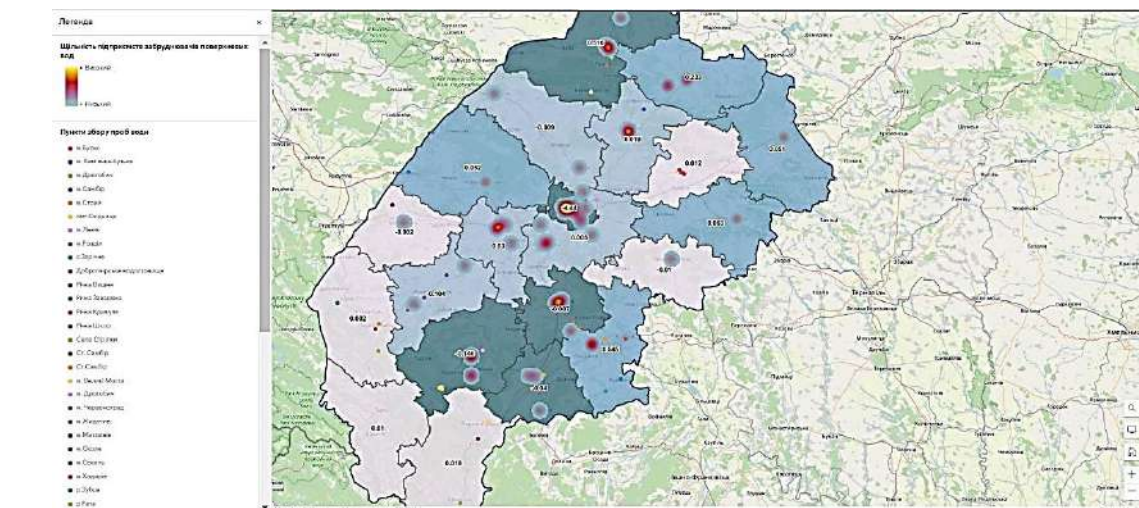


Fig. 3. Surface water monitoring map of Lviv region

• Map of wastewater discharge in Lviv region from treatment plants (Fig. 4).

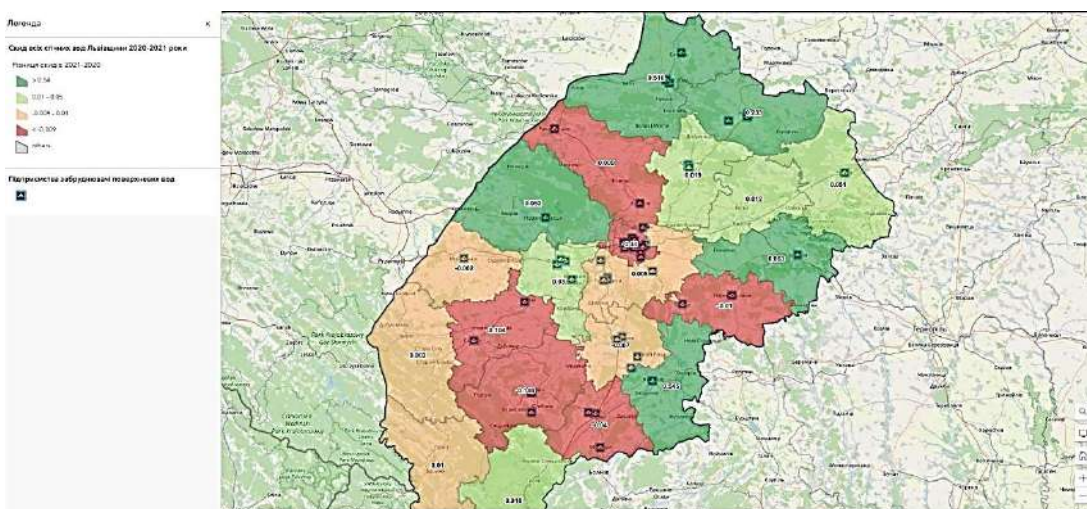


Fig. 4. Map of wastewater discharge in Lviv region from treatment plants

Conclusions and proposals. Thus, having studied the problem of surface water quality in Lviv region, the following can be concluded:

1. Based on the collected and systematized data, a map of enterprises polluting surface waters of Lviv region has been developed.
2. An interactive map with sample collection points in the rivers of Lviv region has been developed on the basis of GIS software.
3. Based on remote sensing data, a map monitoring of surface waters of the Lviv region has been developed.
4. A map of wastewater discharge from sewage treatment plants in Lviv region has been developed.

References

1. Department of Ecology and Natural Resources of Lviv Regional State Administration. (2021) Ecology of Lviv region 2020. Lviv: SPOLOM.
2. Department of Ecology and Natural Resources of Lviv Regional State Administration. (2022) Environmental passport of Lviv region for 2021. Lviv: SPOLOM.
3. Department of Ecology and Natural Resources of Lviv Regional State Administration. (2022) Regional report on the state of the environment in Lviv region in 2021. Lviv: SPOLOM.
4. Sohor, A.R., Fys, M.M., Brydun, A.M., Sohor, M.A. (2020). Web-mapping of environmental pollution of the surface waters of the Lviv region. Astronomical School’s Report, 16(2), 33-37. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.16.05>.

5. Sohor, A., Holubinka, Yu., Shapoval, V., Sohor, M. (2020). Interactive map of pollution of surface waters of Lviv. *Young Scientist*, 2(78), 193-199. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-2-78-44>.
6. Bijeesh, T.V., Narasimhamurthy, K.N. (2020). Surface water detection and delineation using remote sensing images: a review of methods and algorithms Sustain. *Water Resour. Manag*, 6, 68. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00425-4>.
7. Bilgin, A. (2018). Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin. *Environ Monit Assess*, 190, 554. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6927-5>.
8. Kangyang, C., et al. (2020). Comparative analysis of surface water quality prediction performance and identification of key water parameters using different machine learning models based on big data. *Water Research*, 171, 115454. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115454>.
9. Kim-Anh, N., Yuei-An, L. (2019). Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances. *Science of The Total Environment*, 664, 995-1004. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.407>.
10. Tiyasha, T., et al. (2021). Functionalization of remote sensing and on-site data for simulating surface water dissolved oxygen: Development of hybrid tree-based artificial intelligence models. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112639. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112639>.
11. Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R., Proud, S.R. (2014) Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sens. Environ*, 140, 23–35.
12. Frappart, F., Papa, F., Famiglietti, J.S., Prigent, C., Rossow, W.B., Seyler, F. (2008). Interannual variations of river water storage from a multiple satellite approach: A case study for the Rio Negro River basin. *J. Geophys. Res.-Atmos*, 113, D21104.
13. Wenbo, Li., et al. (2013). A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM ETM+ and ALI. *Remote Sens.*, 5, 5530–5549.
14. Normandin, C., et al. (2018). Quantification of surface water volume changes in the Mackenzie Delta using satellite multi-mission data Hydrol. *Earth Syst. Sci.*, 22, 1543–1561.
15. Ogilvie, A., Belaud, G., Massuel, S., Mulligan, M., Le Goulven, P., Calvez, R. (2018). Surface water monitoring in small water bodies: Potential and limits of multi-sensor Landsat time series Hydrol. *Earth Syst. Sci.*, 22, 4349–4380.
16. Pan, F., Wang, C., Xi, X. (2016). Constructing river stage-discharge rating curves using remotely sensed river cross-sectional inundation areas and river bathymetry. *J. Hydrol*, 540, 670–687.
17. Pan, F., Xi, X., Wang, C. (2020). A Comparative Study of Water Indices and Image Classification Algorithms for Mapping Inland Surface Water Bodies Using Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 12(10), 1611. <https://doi.org/10.3390/rs12101611>.
18. Schwatke, C., Scherer, D., Dettmering, D. (2019). Automated extraction of consistent time-variable water surfaces of lakes and reservoirs based Landsat and Sentinel-2. *Remote Sens.*, 11, 1010.
19. Yang X., Chen L. (2017) Evaluation of automated urban surface water extraction from Sentinel-2A imagery using different water indices. *J. Appl. Remote Sens.*, 11, 026016.
20. Chang, N.-B., Imen, S., and Vannah, B. (2015). Remote sensing for monitoring surface water quality status and ecosystem state in relation to the nutrient cycle: a 40-year perspective. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(2), 101-166. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829981>.
21. Habeeb, N. J., Weli, S. T. (2021). Combination of GIS with Different Technologies for Water Quality: An Overview. *HighTech and Innovation Journal*, 2(3), 262-272. <http://dx.doi.org/10.28991/HIJ-2021-02-03-10>.
22. Das, A. K., Prakash, P., Sandilya, C.V.S. and Subhani, S. (2014). Development of Web-Based Application for Generating and Publishing Groundwater Quality Maps Using RS/GIS Technology and P. Mapper in Sattenapalle, Mandal, Guntur District, Andhra Pradesh ICT and Critical Infrastructure. Proceedings of the 48th Annual Convention of Computer Society of India. (Vol. II). PP. 679–686. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03095-1_74.
23. Fathy, A. (2012). Mapping of groundwater prospective zones using remote sensing and GIS techniques: A case study from the Central Eastern Desert. *Egypt Journal of African Earth Sciences*, 70, 8-17.

24.Chen, Q., Zhang, Y., & Hallikainen, M. (2007). Water quality monitoring using remote sensing in support of the EU water framework directive (WFD): A case study in the Gulf of Finland. *Environmental monitoring and assessment*, 124, 157-166.

25.Manap, M.A., Nampak, H., Pradhan, B. et al. (2014). Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 711-724. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0795-z>.

Отримано 05.03.2024

УДК 528.946

Андрій Бридун¹, Андрій Согор², Михайло Фис³, Юрій Губар⁴

¹кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання,
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: andrii.m.brydun@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5634-0512>
ResearcherID: AAC-1271-2020. **Scopus Author ID:** 57212560353

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>.
ResearcherID: ABI-6288-2020. **Scopus Author ID:** 57224950613

³доктор технічних наук, професор, професор кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: mykhailo.m.fys@lpnu.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8956-2293>
ResearcherID: AAB-9528-2020. **Scopus Author ID:** 36091174500

⁴доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кадастру територій
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: yurii.p.hubar@lpnu.ua **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2538-0727>

ВЕБКАРТОГРАФУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД ЛЬВІВЩИНИ ЗАСОБАМИ ГІС ТА ДЗЗ

На екологічний стан поверхневих вод Львівщини впливають різні чинники: забруднення ґрунтів, атмосфери, техногенна завантаженість території, неефективна робота очисних споруд в населених пунктах, забруднення та за- смічення річок побутовими та іншими відходами. Іншою важливою проблемою, що призводить до забруднення пове- рхневих вод в регіоні, є відсутність на території регіону водоохоронних зон та прибережних захисних смуг водойм. Відсутність картографічних матеріалів та невизначеність меж водоохоронних зон та прибережних захисних смуг призводять до порушень земельного та водного законодавства при їх використанні. Наразі стан водних об'єктів у Львівській області знаходиться на незадовільному рівні. Основними проблемами в цій сфері є прогресуючий характер негативного впливу на навколишнє середовище та здоров'я людей. Основною метою цієї роботи було створення веб- карти забруднення поверхневих вод Львівщини, зокрема, за даними дистанційного зондування Землі. Для досягнення цієї мети ми зібрали та систематизували геопросторові статистичні картографічні матеріали щодо екологічного стану поверхневих вод. Крім статистичних даних, для оцінки стану поверхневих вод були використані матеріали дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), отримані з різних джерел. Визначено необхідне програмне забезпечення для розробки такої вебкарти. Розроблено алгоритм завантаження геопросторових даних у створений вебресурс. Таким чином, було розроблено вебкарти забруднення поверхневих вод Львівщини у програмному середовищі «ArcGIS Online».

Ключові слова: геопросторові дані; ГІС; дистанційне зондування Землі; екологічне картографування; забруд- нення поверхневих вод; інтерактивна карта; середовище «ArcGIS Online».

Рис.: 4. Бібл.: 25.

Андрій Согор¹, Дмитро Марченко², Христина Крива³

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>
ResearcherID: [ABI-6288-2020](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552). **Scopus Author ID:** [57224950613](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552)

²кандидат технічних наук, завідувач кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: dmytro.o.marchenko@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5321-0189>
ResearcherID: [HJI-7657-2023](https://orcid.org/0000-0002-5321-0189). **Scopus Author ID:** [57203153570](https://orcid.org/0000-0002-5321-0189)

³аспірант кафедри картографії та геопросторового моделювання

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: khrystyna.o.kryva@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-1564-1511>. **ResearcherID:** [KBC-7973-2024](https://orcid.org/0009-0000-1564-1511)

**СПОСОБИ ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕФЕРЕНЦ-ЕЛІПСОЇДА
ЗА ДАНИМИ РЕГІОНАЛЬНОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ**

У цій роботі отримані параметри референц-еліпсоїда за даними регіонального гравітаційного поля Землі та виконані відповідні дослідження на прикладі території України. За результатами одержаних способів обчислень можна зауважити наступне. Визначення всіх п'яти параметрів референц-еліпсоїда за даними на територію України призводить до сильної функціональної залежності параметрів між собою. Ця залежність (кореляція) досить добре демонструється на значеннях середніх квадратичних похибок, які співрозмірні з отриманими параметрами і навіть перевищують останні. Беручи до уваги ці зауваження, можна зробити висновок, що спільне обчислення всіх п'яти параметрів методом найменших квадратів на територію України не дає нам очікуваних хороших результатів. Це добре видно з обчислень за даними висот геоїда, представлених у вигляді сферодальної трапеції, яка описує територію України. На відміну від такого розв'язку, дослідження з визначення тільки параметрів внутрішнього орієнтування референц-еліпсоїда при заданих його великій півосі та стисненні, дають можливість досить добре підібрати такий земний еліпсоїд, який би найкращим чином представляв геоїд, побудований для певного регіону, наприклад, на територію України.

Ключові слова: велика піввісь еліпсоїда; геоїд; гравітаційне поле Землі; земний еліпсоїд; параметри референц-еліпсоїда; стиснення еліпсоїда.

Табл.: 1. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Незважаючи на високу точність глобальних геодезичних референцних систем та їх широке використання в GPS-вимірюваннях, все більш широко починають застосовуватись регіональні (локальні) геодезичні системи. Наприклад, Світова геодезична система 1984 (WGS 84) налічує 83 такі локальні системи. Поява останніх спричинена появою нових задач фізичної геодезії. Це так звані регіональні задачі, які дають можливість більш детально вивчати як геометричні, так і гравіметричні (фізичні) властивості досліджуваного регіону (території). Дедалі більшої актуальності набувають, наприклад, задачі побудови високоточного регіонального геоїда, регіонального еліпсоїда, визначення регіональної нормальної формули сили тяжіння та інші.

Саме тому в теперішній час для обробки геодезичних даних в регіональних масштабах (наприклад, для якоїсь конкретної країни) приймаються як національні, так і регіональні референц-еліпсоїди, а для глобальних досліджень – земний референц-еліпсоїд GRS 80 або, при обробці даних GPS – земний референц-еліпсоїд WGS 84.

Загалом, для обробки геодезичної інформації можна застосовувати будь-який референц-еліпсоїд, який з відповідною точністю представляє узагальнену фігуру Землі. За відхиленнями геоїда від такого еліпсоїда можна визначити поправки, які повинні бути введені в результати геодезичних вимірювань для приведення останніх до поверхні цього еліпсоїда.

Однак при великих відхиленнях геоїда від референц-еліпсоїда мають місце великі відповідні їм редукації геодезичних вимірювань, які є обтяжені значними похибками внаслідок лінеаризації основної задачі геодезії і, як наслідок, задачі приведення геодезичних вимірювань на еліпсоїд. Отже, з практичного погляду, для зменшення впливу згаданих похибок лінеаризації та одержання методологічно оптимальних результатів опрацювання геодезичних даних доцільно й навіть необхідно використовувати такий референц-еліпсоїд, який найкращим чином описує узагальнену поверхню геоїда в регіоні конкретних геодезичних робіт.

Враховуючи вище сказане, виникло питання про національну референц-систему координат, оскільки така система має деякі переваги перед загальноземною системою в процесі практичної обробки масових геодезичних вимірювань, особливо лінійних. У зв'язку з цим питання побудови національної референц-системи, а саме, визначення параметрів регіонального еліпсоїда, є досить важливі і актуальні.

Постановка проблеми. Як відомо, результати геодезичних вимірювань, які проводяться на земній поверхні для визначення взаємного положення пунктів, тобто кути і відстані між цими пунктами, першочергово відносяться до різних рівневих поверхонь Землі. Те ж саме можна сказати і щодо результатів спостережень в різних точках поверхні Землі, а саме: знаходження їх астрономічної широти, довготи й азимута, які дають напрям лінії важка, як нормалі до рівневих поверхонь в цих пунктах. Тому вказані результати геодезичних та астрономічних визначень повинні бути приведені до однієї рівневої поверхні Землі, тобто до поверхні геоїда [1; 5; 8].

Однак дана поверхня геоїда має досить складну форму. Зрозуміло, що складна поверхня не може служити координатною поверхнею для знаходження взаємного положення геодезичних пунктів. При математичному опрацюванні результатів астрономо-геодезичних вимірювань поверхня геоїда, як правило, замінюється відомою і більш простою поверхнею відносності, а саме: поверхнею деякого еліпсоїда, який має відповідні розміри та займає певне положення в тілі Землі. Такий еліпсоїд обертання прийнято називати референц-еліпсоїдом. Розміри референц-еліпсоїда та його положення або орієнтування в тілі Землі повинні бути встановлені таким чином, щоб його поверхня тою чи іншою мірою була близькою до поверхні геоїда [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями з визначення параметрів загального земного еліпсоїда займалися такі вчені, як Д. В. Загребін [2], Г. О. Мещеряков [3], М. С. Молоденський [4], Г. Моріц [5, 8]. Однак питання з обчислення параметрів регіонального референц-еліпсоїда, який би найкраще за принципом найменших квадратів підходив для поверхні території України, залишається відкритим.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Розміри референц-еліпсоїда характеризуються, як правило, величинами його великої півосі й полярного стиснення, а положення його в тілі Землі переважно визначається складовими відхилення важка в площині меридіана та першого вертикала від нормалі до його поверхні і висотою геоїда в якій-небудь одній точці, яка приймається за вихідний (початковий) пункт геодезичних вимірів. При цьому напрям лінії важка у вихідному пункті відносно основних координатних площин (тобто площин земного екватора й початкового меридіана) встановлюється шляхом астрономічних визначень його широти та довготи. Шляхом виправлення астрономічної широти і довготи вихідного пункту за відхилення лінії важка від нормалі до поверхні референц-еліпсоїда в цьому ж пункті визначаються його геодезична широта і довгота, які разом із висотою геоїда в даному вихідному пункті служать так званими вихідними геодезичними даними для обробки геодезичних вимірювань на поверхні прийнятого референц-еліпсоїда [1; 3; 4].

Методологія такого наукового дослідження полягає в тому, що задача визначення регіонального еліпсоїда практично зводиться до знаходження деяких поправок Δa , $\Delta \alpha$, Δx , Δy , Δz до відомого, прийнятого нами, загального земного еліпсоїда GRS 80. Регіональний еліпсоїд для території України повинен бути таким, який би найкраще представляв геоїд (квазігеоїд) даного регіону. Тобто висоти геоїда відносно регіонального еліпсоїда в межах території України повинні бути якомога менші.

Мета статті. Виходячи із зазначеного вище, мета наших досліджень полягає у виконанні обчислень параметрів референц-еліпсоїда за даними регіонального гравітаційного поля Землі на прикладі геодезичних вимірювань висот геоїда, проведених на території України.

Для досягнення цієї мети в цій науковій роботі поставлені та вирішені такі завдання:

- Визначення лінійних елементів орієнтування еліпсоїда $\Delta x, \Delta y, \Delta z$.
- Обчислення параметрів референц-еліпсоїда $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta a$.
- Знаходження величин регіонального еліпсоїда $\Delta x, \Delta y$.
- Обчислення невідомих параметрів референц-еліпсоїда Δx та Δa .
- Знаходження величин регіонального еліпсоїда Δy та Δa .
- Визначення параметрів еліпсоїда $\Delta z, \Delta a$.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо задачу визначення параметрів референц-еліпсоїда відносно земного еліпсоїда GRS 80 на базі відомих в геодезії формул параметричного методу зрівноваження вимірюваних величин.

Під визначенням референц-еліпсоїда тут будемо розуміти знаходження його параметрів: великої півосі a , полярного стиснення α та прямокутних координат його центра в тілі Землі: x_0, y_0, z_0 . Зв'язок цих величин можна зобразити у вигляді скороченої формули перетворення Молоденського для геодезичної висоти [4]

$$\Delta H = \Delta x \cos \bar{B} \cos \bar{L} + \Delta y \cos \bar{B} \sin \bar{L} + \Delta z \sin \bar{B} + (\bar{a}\Delta\alpha + \bar{\alpha}\Delta a) \sin^2 \bar{B} + \Delta a.$$

Формула Молоденського, як неважно зауважити, дає зв'язок не самих параметрів, а деяких зміщень параметрів $\Delta a, \Delta\alpha, \Delta x, \Delta y, \Delta z$, тобто поправок, які представляють різниці параметрів деяких двох еліпсоїдів. У цій формулі: ΔH – різниця геодезичних висот деякої точки на поверхні Землі відносно кожного з двох еліпсоїдів. Практично, ця величина може бути записана як [2]

$$\Delta H = N - \bar{N},$$

де N і \bar{N} – висоти геоїда відносно кожного з еліпсоїдів.

Отже, щоби знайти необхідні параметри a, α, x_0, y_0, z_0 деякого еліпсоїда E , потрібно вже мати якийсь еліпсоїд \bar{E} із відомими параметрами $\bar{a}, \bar{\alpha}, \bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$.

Тоді

$$\left. \begin{aligned} a &= \bar{a} + \Delta a; \\ \alpha &= \bar{\alpha} + \Delta\alpha; \\ x_0 &= \bar{x}_0 + \Delta x; \\ y_0 &= \bar{y}_0 + \Delta y; \\ z_0 &= \bar{z}_0 + \Delta z. \end{aligned} \right\}$$

Загалом можна використовувати будь-який відомий еліпсоїд \bar{E} ($\bar{a}, \bar{\alpha}, \bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$). Але, як ми побачимо нижче, найкраще прийняти саме геоцентричний еліпсоїд. Таким еліпсоїдом може бути, наприклад, земний еліпсоїд GRS 80 або земний еліпсоїд WGS 84 [7].

Як неважно зауважити, всі величини у формулі Молоденського із ризикою зверху повинні бути відомі та віднесені до системи GRS 80, а величини без ризику будуть невідомі.

Отже, задача визначення параметрів референц-еліпсоїда практично зводиться до знаходження деяких поправок $\Delta a, \Delta\alpha, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ до відомого, прийнятого нами, земного еліпсоїда GRS 80.

Референц-еліпсоїд для території України повинен бути таким, який би найкраще представляв геоїд даного регіону. Тобто висоти геоїда N відносно референц-еліпсоїда в межах території України повинні бути якомога менші. Враховуючи цю основну вимогу, виконаємо апріорні дослідження з визначення референц-еліпсоїда для України.

Оскільки нам необхідно визначити п'ять невідомих поправок $\Delta a, \Delta\alpha, \Delta x, \Delta y, \Delta z$, то потрібно мати хоча б п'ять точок у межах території України з відомими геодезичними координатами $\bar{B}, \bar{L}, \bar{H}$.

За планові координати \bar{B} і \bar{L} приймемо наближені геодезичні координати вершин сфероїдальної трапеції $ABCD$ та її центра O , у яку (трапецію) вписується територія України.

Тобто $A(B_A = 52,5^0; L_A = 21,6^0)$; $B(B_B = 52,5^0; L_B = 40,0^0)$; $C(B_C = 44,1^0; L_C = 40,0^0)$; $D(B_D = 44,1^0; L_D = 21,6^0)$; $O(B_O = 48,3^0; L_O = 30,8^0)$.

Зауважимо, що хоча геодезичні координати точок A, B, C, D, O даються в системі референц-еліпсоїда Красовського, вони є наближеними, тому їх цілком можна вважати такими, що відомі в системі GRS 80 або WGS 84.

Висоти геоїда \bar{N} відповідних точок території України можна обчислити із розкладу потенціалу сили тяжіння в ряд сферичних функцій. Скориставшись відомою моделлю GEMT1 (із $n = m = 36$) [9], отримуємо наступні значення \bar{N} :

$$\bar{N}_A = 30,7 \text{ м}; \bar{N}_B = 9,8 \text{ м}; \bar{N}_C = 16,5 \text{ м}; \bar{N}_D = 43,7 \text{ м}; \bar{N}_O = 25,9 \text{ м}.$$

Маючи необхідні вихідні дані та використовуючи формулу Молоденського, у якій невідомі поправки $\Delta a, \Delta \alpha, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ представлені в лінійному вигляді, запишемо наступні параметричні рівняння для описаних п'яти точок (A, B, C, D, O):

$$\left. \begin{aligned} a_A \Delta x + b_A \Delta y + c_A \Delta z + d_A \bar{a} \Delta \alpha + e_A \Delta a + l_A &= v_A; \\ a_B \Delta x + b_B \Delta y + c_B \Delta z + d_B \bar{a} \Delta \alpha + e_B \Delta a + l_B &= v_B; \\ a_C \Delta x + b_C \Delta y + c_C \Delta z + d_C \bar{a} \Delta \alpha + e_C \Delta a + l_C &= v_C; \\ a_D \Delta x + b_D \Delta y + c_D \Delta z + d_D \bar{a} \Delta \alpha + e_D \Delta a + l_D &= v_D; \\ a_O \Delta x + b_O \Delta y + c_O \Delta z + d_O \bar{a} \Delta \alpha + e_O \Delta a + l_O &= v_O, \end{aligned} \right\}$$

де

$$\left. \begin{aligned} a_A &= \cos B_A \cos L_A; b_A = \cos B_A \sin L_A; c_A = \sin B_A; d_A = \sin^2 B_A; e_A = 1 - \bar{a} \sin^2 B_A; \\ a_B &= \cos B_B \cos L_B; b_B = \cos B_B \sin L_B; c_B = \sin B_B; d_B = \sin^2 B_B; e_B = 1 - \bar{a} \sin^2 B_B; \\ a_C &= \cos B_C \cos L_C; b_C = \cos B_C \sin L_C; c_C = \sin B_C; d_C = \sin^2 B_C; e_C = 1 - \bar{a} \sin^2 B_C; \\ a_D &= \cos B_D \cos L_D; b_D = \cos B_D \sin L_D; c_D = \sin B_D; d_D = \sin^2 B_D; e_D = 1 - \bar{a} \sin^2 B_D; \\ a_O &= \cos B_O \cos L_O; b_O = \cos B_O \sin L_O; c_O = \sin B_O; d_O = \sin^2 B_O; e_O = 1 - \bar{a} \sin^2 B_O \end{aligned} \right\}$$

та

$$v_A = N_A; v_B = N_B; v_C = N_C; v_D = N_D; v_O = N_O.$$

Праві частини даної системи рівнянь, як можна зауважити, будуть відігравати роль невідомих поправок. Оскільки така система із п'яти рівнянь має десять невідомих величин ($\Delta a, \Delta \alpha, \Delta x, \Delta y, \Delta z, v_A, v_B, v_C, v_D, v_O$), то накладемо на неї (систему) додаткову умову методу найменших квадратів:

$$\sum v_i^2 \rightarrow \min, \text{ де } i = A, B, C, D, O,$$

щоби одержати єдиний розв'язок.

Знайдемо спочатку коефіцієнти параметричних рівнянь поправок даної системи. Результати запишемо в таблицю 1.

Вільні члени параметричних рівнянь поправок цієї системи тоді можна записати

$$l_A = \bar{N}_A; l_B = \bar{N}_B; l_C = \bar{N}_C; l_D = \bar{N}_D; l_O = \bar{N}_O.$$

Підставляючи замість висот геоїда $\bar{N}_A, \bar{N}_B, \bar{N}_C, \bar{N}_D, \bar{N}_O$ їх значення, одержимо

$$l_A = 30,7 \text{ м}; l_B = 9,8 \text{ м}; l_C = 16,5 \text{ м}; l_D = 43,7 \text{ м}; l_O = 25,9 \text{ м}.$$

Таблиця 1 – Обчислення коефіцієнтів параметричних рівнянь поправок

Назви точок	Величина	Значення	Величина	Значення	Коефіцієнт	Значення
т, А	$\cos B_A$	0,608761	$\cos B_A \cos L_A$	0,5660113	a_A	-0,5660113
	$\cos L_A$	0,929776	$\cos B_A \sin L_A$	0,2241001	b_A	-0,2241001
	$\sin B_A$	0,793353	$\sin^2 B_A$	0,6294089	c_A	-0,793353
	$\sin L_A$	0,368125			d_A	0,6294089
					e_A	-0,9978897
т, В	$\cos B_B$	0,608761	$\cos B_B \cos L_B$	0,4663377	a_B	-0,4663377
	$\cos L_B$	0,766044	$\cos B_B \sin L_B$	0,3913042	b_B	-0,3913042
	$\sin B_B$	0,793353	$\sin^2 B_B$	0,6294089	c_B	-0,793353
	$\sin L_B$	0,642788			d_B	0,6294089
					e_B	-0,9978897
т, С	$\cos B_C$	0,718126	$\cos B_C \cos L_C$	0,5501161	a_C	-0,5501161
	$\cos L_C$	0,766044	$\cos B_C \sin L_C$	0,4616027	b_C	-0,4616027
	$\sin B_C$	0,695913	$\sin^2 B_C$	0,4842949	c_C	-0,695913
	$\sin L_C$	0,642788			d_C	0,4842949
					e_C	-0,9983762
т, D	$\cos B_D$	0,718126	$\cos B_D \cos L_D$	0,6676963	a_D	-0,6676963
	$\cos L_D$	0,929776	$\cos B_D \sin L_D$	0,2643601	b_D	-0,2643601
	$\sin B_D$	0,695913	$\sin^2 B_D$	0,4842949	c_D	-0,6959130
	$\sin L_D$	0,368125			d_D	0,4842949
					e_D	-0,9983762
т, O	$\cos B_O$	0,665230	$\cos B_O \cos L_O$	0,5714059	a_O	-0,5714059
	$\cos L_O$	0,858960	$\cos B_O \sin L_O$	0,3406263	b_O	-0,3406263
	$\sin B_O$	0,746638	$\sin^2 B_O$	0,5574683	c_O	-0,746638
	$\sin L_O$	0,512043			d_O	0,5574683
					e_O	-0,9981309

Отже, приймаючи значення коефіцієнтів із таблиці 1 та значення обчислених вільних членів, розв'яжемо систему параметричних рівнянь поправок під умовою методу найменших квадратів. Тоді одержимо такі шукані параметри та їх середні квадратичні похибки:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= -5 \pm 28 \text{ м} \\ \Delta y &= -136 \pm 17 \text{ м} \\ \Delta z &= 982 \pm 549 \text{ м} \\ \bar{a} \Delta \alpha &= 783 \pm 393 \text{ м} \\ \Delta a &= -222 \pm 170 \text{ м.} \end{aligned} \right\}.$$

Одержані апіорні значення параметрів регіонального референц-еліпсоїда та їх похибки вказують на досить сильну залежність (кореляцію) між невідомими величинами. Щоби виявити, які саме величини найбільше корелюють між собою, потрібно виконати деякі додаткові дослідження з обчислення шуканих параметрів. Розглянемо декілька способів.

Спосіб 1. Припустимо, що параметри Δa та $\Delta \alpha$ є відомими. Тоді будемо шукати лише лінійні елементи орієнтування Δx , Δy , Δz референц-еліпсоїда.

Тобто параметричні рівняння будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} a_A \Delta x + b_A \Delta y + c_A \Delta z + l_A^{(1)} &= v_A; \\ a_B \Delta x + b_B \Delta y + c_B \Delta z + l_B^{(1)} &= v_B; \\ a_C \Delta x + b_C \Delta y + c_C \Delta z + l_C^{(1)} &= v_C; \\ a_D \Delta x + b_D \Delta y + c_D \Delta z + l_D^{(1)} &= v_D; \\ a_O \Delta x + b_O \Delta y + c_O \Delta z + l_O^{(1)} &= v_O, \end{aligned} \right\}$$

а вільні члени запишуться таким чином:

$$\left. \begin{aligned} l_A^{(1)} &= (\bar{a}\Delta\alpha + \bar{a}\Delta a) \sin^2 B_A + \Delta a + \bar{N}_A; \\ l_B^{(1)} &= (\bar{a}\Delta\alpha + \bar{a}\Delta a) \sin^2 B_B + \Delta a + \bar{N}_B; \\ l_C^{(1)} &= (\bar{a}\Delta\alpha + \bar{a}\Delta a) \sin^2 B_C + \Delta a + \bar{N}_C; \\ l_D^{(1)} &= (\bar{a}\Delta\alpha + \bar{a}\Delta a) \sin^2 B_D + \Delta a + \bar{N}_D; \\ l_O^{(1)} &= (\bar{a}\Delta\alpha + \bar{a}\Delta a) \sin^2 B_O + \Delta a + \bar{N}_O. \end{aligned} \right\}$$

Відповідні коефіцієнти системи виберемо з таблиці 1. Для обчислення вільних членів потрібно ввести деякі числові значення для поправок Δa , $\Delta\alpha$, за які можемо прийняти параметри зміщення Європейської геодезичної референцної системи у Світовій геодезичній системі WGS 84 [7]

$$\left. \begin{aligned} \Delta a &= 251 \text{ м}; \\ \Delta\alpha &= 0,14192702 \cdot 10^{-4}; \\ \Delta x &= -87 \text{ м}; \\ \Delta y &= -98 \text{ м}; \\ \Delta z &= -121 \text{ м}. \end{aligned} \right\}$$

Приймаючи значення Δa і $\Delta\alpha$ із цього виразу, обчислимо значення вільних членів. Тобто

$$l_A^{(1)} = -162,8 \text{ м}; l_B^{(1)} = -183,7 \text{ м}; l_C^{(1)} = -190,3 \text{ м}; l_D^{(1)} = -163,1 \text{ м}; l_O^{(1)} = -174,2 \text{ м}.$$

Тоді, маючи відповідні значення коефіцієнтів із таблиці 1 та вільних членів, розв'яжемо систему параметричних рівнянь під умовою методу найменших квадратів. Невідомі величини та їх середні квадратичні похибки набудуть такі значення:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= -58 \pm 9 \text{ м}; \\ \Delta y &= -167 \pm 8 \text{ м}; \\ \Delta z &= -115 \pm 8 \text{ м}. \end{aligned} \right\}$$

Розглянемо тепер наступний спосіб.

Спосіб 2. Нехай нам відома тільки величина $\Delta\alpha$. Необхідно знайти параметри Δx , Δy , Δz , Δa . Параметричні рівняння в такому випадку набудуть вигляду:

$$\left. \begin{aligned} a_A \Delta x + b_A \Delta y + c_A \Delta z + e_A \Delta a + l_A^{(2)} &= v_A; \\ a_B \Delta x + b_B \Delta y + c_B \Delta z + e_B \Delta a + l_B^{(2)} &= v_B; \\ a_C \Delta x + b_C \Delta y + c_C \Delta z + e_C \Delta a + l_C^{(2)} &= v_C; \\ a_D \Delta x + b_D \Delta y + c_D \Delta z + e_D \Delta a + l_D^{(2)} &= v_D; \\ a_O \Delta x + b_O \Delta y + c_O \Delta z + e_O \Delta a + l_O^{(2)} &= v_O, \end{aligned} \right\}$$

а вільні члени рівні

$$\left. \begin{aligned} l_A^{(2)} &= \bar{a} \sin^2 B_A \Delta\alpha + \bar{N}_A; \\ l_B^{(2)} &= \bar{a} \sin^2 B_B \Delta\alpha + \bar{N}_B; \\ l_C^{(2)} &= \bar{a} \sin^2 B_C \Delta\alpha + \bar{N}_C; \\ l_D^{(2)} &= \bar{a} \sin^2 B_D \Delta\alpha + \bar{N}_D; \\ l_O^{(2)} &= \bar{a} \sin^2 B_O \Delta\alpha + \bar{N}_O. \end{aligned} \right\}$$

Коефіцієнти такої системи можна взяти з таблиці 1. Тоді вільні члени з врахуванням відомої $\Delta\alpha$, після нескладних обчислень будуть мати значення:

$$l_A^{(2)} = 87,7 \text{ м}; l_B^{(2)} = 66,8 \text{ м}; l_C^{(2)} = 60,3 \text{ м}; l_D^{(2)} = 87,5 \text{ м}; l_O^{(2)} = 76,4 \text{ м}.$$

Таким чином, враховуючи відповідні значення з таблиці 1, розв'яжемо систему параметричних рівнянь поправок під умовою методу найменших квадратів. Тоді одержимо:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= 110 \pm 89 \text{ м}; \\ \Delta y &= -67 \pm 53 \text{ м}; \\ \Delta z &= 101 \pm 115 \text{ м}; \\ \Delta a &= -39 \pm 154 \text{ м}. \end{aligned} \right\}$$

Список 3. Нехай відомі величини $\Delta a, \Delta\alpha, \Delta z$. Потрібно знайти величини $\Delta x, \Delta y$. Параметричні рівняння поправок тоді запишуться як:

$$\left. \begin{aligned} a_A \Delta x + b_A \Delta y + l_A^{(3)} &= v_A; \\ a_B \Delta x + b_B \Delta y + l_B^{(3)} &= v_B; \\ a_C \Delta x + b_C \Delta y + l_C^{(3)} &= v_C; \\ a_D \Delta x + b_D \Delta y + l_D^{(3)} &= v_D; \\ a_O \Delta x + b_O \Delta y + l_O^{(3)} &= v_O. \end{aligned} \right\}$$

Коефіцієнти в цих рівняннях також можна вибрати із таблиці 1. Тоді вільні члени такої системи, як неважно зауважити, приймуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} l_A^{(3)} &= \sin B_A \Delta z + (\bar{a} \Delta\alpha + \bar{\alpha} \Delta a) \sin^2 B_A + \Delta a + \bar{N}_A; \\ l_B^{(3)} &= \sin B_B \Delta z + (\bar{a} \Delta\alpha + \bar{\alpha} \Delta a) \sin^2 B_B + \Delta a + \bar{N}_B; \\ l_C^{(3)} &= \sin B_C \Delta z + (\bar{a} \Delta\alpha + \bar{\alpha} \Delta a) \sin^2 B_C + \Delta a + \bar{N}_C; \\ l_D^{(3)} &= \sin B_D \Delta z + (\bar{a} \Delta\alpha + \bar{\alpha} \Delta a) \sin^2 B_D + \Delta a + \bar{N}_D; \\ l_O^{(3)} &= \sin B_O \Delta z + (\bar{a} \Delta\alpha + \bar{\alpha} \Delta a) \sin^2 B_O + \Delta a + \bar{N}_O. \end{aligned} \right\}$$

Якщо прийняти величини \bar{a} та $\bar{\alpha}$ і значення $\Delta a, \Delta\alpha, \Delta z$ відомими, то вільні члени після нескладних обчислень будуть рівні:

$$l_A^{(3)} = -66,8 \text{ м}; l_B^{(3)} = -87,7 \text{ м}; l_C^{(3)} = -106,0 \text{ м}; l_D^{(3)} = -78,8 \text{ м}; l_O^{(3)} = -83,8 \text{ м}.$$

Тоді, розв'язавши такі параметричні рівняння під умовою методу найменших квадратів, одержимо:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= -52 \pm 4 \text{ м}; \\ \Delta y &= -164 \pm 6 \text{ м}. \end{aligned} \right\}$$

Список 4. Нехай нам задані величини $\Delta y, \Delta z$ і $\Delta\alpha$. Необхідно знайти величини Δx та Δa . Тоді параметричні рівняння поправок будуть мати такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} a_A \Delta x + e_A \Delta a + l_A^{(4)} &= v_A; \\ a_B \Delta x + e_B \Delta a + l_B^{(4)} &= v_B; \\ a_C \Delta x + e_C \Delta a + l_C^{(4)} &= v_C; \\ a_D \Delta x + e_D \Delta a + l_D^{(4)} &= v_D; \\ a_O \Delta x + e_O \Delta a + l_O^{(4)} &= v_O, \end{aligned} \right\}$$

де

$$\left. \begin{aligned} l_A^{(4)} &= \cos B_A \sin L_A \Delta y + \sin B_A \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_A \Delta \alpha + \bar{N}_A; \\ l_B^{(4)} &= \cos B_B \sin L_B \Delta y + \sin B_B \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_B \Delta \alpha + \bar{N}_B; \\ l_C^{(4)} &= \cos B_C \sin L_C \Delta y + \sin B_C \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_C \Delta \alpha + \bar{N}_C; \\ l_D^{(4)} &= \cos B_D \sin L_D \Delta y + \sin B_D \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_D \Delta \alpha + \bar{N}_D; \\ l_O^{(4)} &= \cos B_O \sin L_O \Delta y + \sin B_O \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_O \Delta \alpha + \bar{N}_O. \end{aligned} \right\}$$

Аналогічним чином обчислимо вільні члени цієї системи рівнянь, отримаємо

$$l_A^{(4)} = 205,6 \text{ м}; l_B^{(4)} = 201,1 \text{ м}; l_C^{(4)} = 189,8 \text{ м}; l_D^{(4)} = 197,7 \text{ м}; l_O^{(4)} = 200,1 \text{ м}.$$

Прийнявши коефіцієнти із таблиці 1 та отримані вільні члени, розв'яжемо систему параметричних рівнянь поправок під умовою методу найменших квадратів. Тоді отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= -10 \pm 47 \text{ м}; \\ \Delta a &= 205 \pm 27 \text{ м}. \end{aligned} \right\}$$

Розглянемо наступний спосіб.

Спосіб 5. Припустимо, що нам відомі значення величин Δx , Δz і $\Delta \alpha$. Знайдемо величини Δy та Δa . У такому випадку, параметричні рівняння поправок приймуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} b_A \Delta y + e_A \Delta a + l_A^{(5)} &= v_A; \\ b_B \Delta y + e_B \Delta a + l_B^{(5)} &= v_B; \\ b_C \Delta y + e_C \Delta a + l_C^{(5)} &= v_C; \\ b_D \Delta y + e_D \Delta a + l_D^{(5)} &= v_D; \\ b_O \Delta y + e_O \Delta a + l_O^{(5)} &= v_O, \end{aligned} \right\}$$

а вільні члени такої системи рівнянь запишуться як

$$\left. \begin{aligned} l_A^{(5)} &= \cos B_A \cos L_A \Delta x + \sin B_A \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_A \Delta \alpha + \bar{N}_A; \\ l_B^{(5)} &= \cos B_B \cos L_B \Delta x + \sin B_B \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_B \Delta \alpha + \bar{N}_B; \\ l_C^{(5)} &= \cos B_C \cos L_C \Delta x + \sin B_C \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_C \Delta \alpha + \bar{N}_C; \\ l_D^{(5)} &= \cos B_D \cos L_D \Delta x + \sin B_D \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_D \Delta \alpha + \bar{N}_D; \\ l_O^{(5)} &= \cos B_O \cos L_O \Delta x + \sin B_O \Delta z + \bar{a} \sin^2 B_O \Delta \alpha + \bar{N}_O. \end{aligned} \right\}$$

Набуваючи значення Δx , Δz і $\Delta \alpha$ відомими, будемо мати

$$l_A^{(5)} = 232,9 \text{ м}; l_B^{(5)} = 203,3 \text{ м}; l_C^{(5)} = 192,4 \text{ м}; l_D^{(5)} = 229,8 \text{ м}; l_O^{(5)} = 216,4 \text{ м}.$$

Враховуючи коефіцієнти з таблиці 1 та обчислені вільні члени, розв'яжемо таку систему рівнянь під умовою методу найменших квадратів. Тоді одержимо:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y &= -179 \pm 12 \text{ м}; \\ \Delta a &= 276 \pm 4 \text{ м}. \end{aligned} \right\}$$

Розглянемо останній спосіб.

Спосіб 6. Нехай відомі величини Δx , Δy , $\Delta \alpha$. Необхідно обчислити значення величин Δz , Δa . Параметричні рівняння поправок тоді запишуться:

$$\left. \begin{aligned} c_A \Delta z + e_A \Delta a + l_A^{(6)} &= v_A; \\ c_B \Delta z + e_B \Delta a + l_B^{(6)} &= v_B; \\ c_C \Delta z + e_C \Delta a + l_C^{(6)} &= v_C; \\ c_D \Delta z + e_D \Delta a + l_D^{(6)} &= v_D; \\ c_O \Delta z + e_O \Delta a + l_O^{(6)} &= v_O, \end{aligned} \right\}$$

де

$$\left. \begin{aligned} l_A^{(6)} &= \cos B_A \cos L_A \Delta x + \cos B_A \sin L_A \Delta y + \bar{a} \sin^2 B_A \Delta \alpha + \bar{N}_A; \\ l_B^{(6)} &= \cos B_B \cos L_B \Delta x + \cos B_B \sin L_B \Delta y + \bar{a} \sin^2 B_B \Delta \alpha + \bar{N}_B; \\ l_C^{(6)} &= \cos B_C \cos L_C \Delta x + \cos B_C \sin L_C \Delta y + \bar{a} \sin^2 B_C \Delta \alpha + \bar{N}_C; \\ l_D^{(6)} &= \cos B_D \cos L_D \Delta x + \cos B_D \sin L_D \Delta y + \bar{a} \sin^2 B_D \Delta \alpha + \bar{N}_D; \\ l_O^{(6)} &= \cos B_O \cos L_O \Delta x + \cos B_O \sin L_O \Delta y + \bar{a} \sin^2 B_O \Delta \alpha + \bar{N}_O. \end{aligned} \right\}$$

Прийнявши значення величин Δx , Δy і $\Delta \alpha$ відомими, вільні члени приймуть наступні результати:

$$l_A^{(6)} = 158,9 \text{ м}; l_B^{(6)} = 145,7 \text{ м}; l_C^{(6)} = 153,4 \text{ м}; l_D^{(6)} = 171,5 \text{ м}; l_O^{(6)} = 159,5 \text{ м}.$$

Врахувавши значення відповідних коефіцієнтів із таблиці 1 та результати обчислених вільних членів, розв'яжемо таку систему параметричних рівнянь під умовою методу найменших квадратів. Тоді будемо мати:

$$\left. \begin{aligned} \Delta z &= -103 \pm 94 \text{ м}; \\ \Delta a &= 235 \pm 70 \text{ м}. \end{aligned} \right\}$$

Висновки. Таким чином, на основі одержаних результатів вище проведених досліджень можна зауважити наступне.

1. Спільне знаходження всіх п'яти параметрів Δa , $\Delta \alpha$, Δx , Δy , Δz методом найменших квадратів на територію України не дає нам очікуваних хороших результатів. Це добре видно з обчислень за даними висот геоїда, представлених у вигляді сфероїдальної трапеції, яка описує територію України. Визначення всіх п'яти параметрів референц-еліпсоїда спричинене сильною функціональною залежністю параметрів між собою. Ця залежність (кореляція) досить добре демонструється на значеннях середніх квадратичних похибок, які співрозмірні з отриманими параметрами і навіть перевищують останні.

2. На відміну від такого розв'язку, дослідження з визначення тільки трьох параметрів Δx , Δy , Δz при заданих Δa та $\Delta \alpha$, що продемонстровані у способі 1, дають можливість досить добре підібрати такий референц-еліпсоїд, який би найкраще представляв геоїд, побудований на територію України.

3. Обчислення за способом 3 лише двох параметрів Δx , Δy при заданих інших трьох також показало хороші результати знаходження регіонального референц-еліпсоїда.

4. Результати обчислень за способами 2, 4, 5, 6 показали найбільшу кореляцію між такими величинами: а) Δa та Δx ; б) Δa та Δy ; в) Δa та Δz .

Розв'язок таких задач демонструє нам дуже відмінні між собою результати, що були одержані за одними й тими ж даними на одну і ту ж територію. Це наводить нас на необхідність проведення додаткових досліджень щодо одержання коректних розв'язків так званих погано зумовлених задач [6].

Список використаних джерел

1. Гоффманн-Велленгоф, Б. Физическая геодезия : монография / Б. Гоффманн-Велленгоф, Г. Мориц; под ред. Ю. М. Неймана. – Москва : Изд-во МИИГАиК, 2007. – 426 с.
2. Загребин, Д. В. Теория регуляризованного геоида / Д. В. Загребин // Труды ИТА. – 1952. – № 1. – С. 52-61.

3. Мещеряков, Г.А. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Марса : монография / Г. А. Мещеряков, А. Л. Церклевич. – Киев : Наукова думка, 1987. – 240 с.
4. Молоденский, М. С. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли / М. С. Молоденский, В. Ф. Еремеев, М. И. Юркина // Труды ЦНИИГАиК. – 1960. – Вып. 131. – С. 250-251.
5. Мориц, Г. Современная физическая геодезия : монография / Г. Мориц. – Москва : Недра, 1983. – 392 с.
6. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики : учеб. пособ. / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1966. – 724 с.
7. Boucher, C. ITRS, PZ–90 and WGS–84: Current Realizations and the Related Transformation Parameters / C. Boucher, Z. Altamimi // Journal of Geodesy. – 2001. – Vol. 75. – P. 613-619.
8. Heiskanen, W. Physical Geodesy / W. Heiskanen, H. Moritz. – San Francisco : W. H. Freeman and Company, California, 1967. – 402 p.
9. Lelgemann, D. Spherical Approximation and the Combination of Gravimetric and Satellite Data / D. Lelgemann // Boll. Geold. Sci. Affini. – 1973. – Vol. 32. – Pp. 241-250.

References

1. Hoffmann-Wellenhof, B., Moritz, H. (2007). *Fizicheskaya geodeziya [Physical geodesy]*. Izd-vo MIIAGiK.
2. Zagrebin, D.V. (1952). Teoriya regularizirovannogo geoida [Theory of regularized geoid]. *Trudy ITA, 1*, 52-61.
3. Meshcheryakov, G.A., TSerklevich, A.L. (1987). *Gravitacionnoe pole, figura i vnutrennee stroenie Marsa [Gravitational field, figure and internal structure of Mars]*. Kyiv.
4. Molodenskiy, M.S., Eremeyev, V.F., Yurkina, M.I. (1960). Metody izucheniya vneshnego gravitacionnogo polya i figury Zemli [Methods for studying the external gravitational field and the figure of the Earth]. *Trudy TSNIIGAiK, 131*, 250-251.
5. Moritz, H. (1983). *Sovremennaya fizicheskaya geodeziya [Advanced physical geodesy]*. Nedra.
6. Tikhonov, A.N., Samarskiy, A.A. (1966). *Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]*. Nauka.
7. Boucher, C., Altamimi, Z. (2001). ITRS, PZ–90 and WGS–84: Current Realizations and the Related Transformation Parameters. *Journal of Geodesy, 75*, 613–619.
8. Heiskanen, W. and Moritz, H. (1967). *Physical Geodesy*. W.H. Freeman and Company. San Francisco, California.
9. Lelgemann, D. (1973). Spherical Approximation and the Combination of Gravimetric and Satellite Data. *Boll. Geold. Sci. Affini, 32*, 241–250.

Отримано 26.02.2024

UDC 528.2

Andrii Sohor¹, Dmytro Marchenko², Khrystyna Kryva³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>

ResearcherID: [ABI-6288-2020](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552). **Scopus Author ID:** [57224950613](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552)

²PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: dmytro.o.marchenko@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5321-0189>

ResearcherID: [HJI-7657-2023](https://orcid.org/0000-0002-5321-0189). **Scopus Author ID:** [57203153570](https://orcid.org/0000-0002-5321-0189)

³ Graduate Student of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: khrystyna.o.kryva@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-1564-1511>. **ResearcherID:** [KBC-7973-2024](https://orcid.org/0009-0000-1564-1511)

METHODS OF CALCULATING THE PARAMETERS OF THE REFERENCE ELLIPSOID ACCORDING TO THE DATA OF THE REGIONAL GRAVITY FIELD OF THE EARTH

The novelty and relevance of scientific solutions lie in the necessity to establish a national reference system, namely the determination of parameters for a regional ellipsoid. The methodology of such scientific research involves the task of defining a regional ellipsoid, which practically reduces to finding corrections to the adopted global ellipsoid GRS80. The regional ellipsoid for the territory of Ukraine should best represent the geoid of this region. In other words, the geoid heights relative to the regional ellipsoid within the territory of Ukraine should be minimized as much as possible.

The purpose of the article is to obtain the parameters of the regional ellipsoid for the territory of Ukraine and investigate the effectiveness of such a reference system in solving certain practical and scientific geodetic tasks.

Thus, based on the results obtained from the conducted research, the following observations can be made. Determining all five parameters of the regional ellipsoid is strongly influenced by the functional dependence of these parameters on each other. This dependence (correlation) is well demonstrated by the values of mean square errors, which are proportional to the obtained parameters and even exceed them. The highest correlation arises between the correction to the major axis of the ellipsoid and the linear elements of its center displacement within the Earth's body. Taking these observations into account, it can be concluded that the simultaneous determination of all five parameters using the least squares method for the territory of Ukraine does not yield the expected good results. This is evident from the calculations of geoid heights presented in the form of a spheroidal trapezoid describing the territory of Ukraine. In contrast, research on determining only three parameters of ellipsoid displacement at given dimensions provides the opportunity to reasonably fit a regional ellipsoid that best represents the geoid constructed on the territory of Ukraine. The solution to these problems has demonstrated very different results obtained under the same data for the same territory. This leads us to the necessity of conducting additional research to obtain correct solutions for so-called ill-conditioned problems.

Keywords: *major axis of ellipsoid; geoid; gravitational field of the Earth; Earth ellipsoid; reference ellipsoid parameters; ellipsoid compression.*

Table: 1. References: 9.

Олександр Тадєєв

кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та картографії

Національний університет водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)

E-mail: o.a.tadeyev@nuwm.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4566-0160>. ResearcherID: B-6081-2019**ДО ПРОБЛЕМИ ОЦІНЮВАННЯ КУТОВИХ СПОТВОРЕНЬ
СУЧАСНИХ ЗЕМНИХ РЕФЕРЕНЦНИХ СИСТЕМ**

Представлена у статті інформація є науково-методичного характеру. Пропонується узагальнюючий підхід і метод вирішення проблеми оцінювання куткових спотворень сучасних земних референціальних систем, які спричинені впливом геодинамічних процесів і підлягають визначенню за даними моніторингу Землі методом глобальних навігаційних супутникових систем GNSS. В основу методу покладено теорію перетворення образів ріманового простору в формі складних диффеоморфних многовидів – дотичного евклідового простору, який параметризовано прямокутною декартовою системою координат. Такий вибір обґрунтований тим фактом, що саме ця система параметризації є геометричною основою сучасних референціальних систем і підлягає моніторингу методом GNSS. Проблема оцінювання спотворень референціальних систем розглянута у взаємозв'язку з проблемою оцінювання деформацій Землі. Наведено теоретичні обґрунтування, алгоритм побудови функціональної моделі на засадах гомеоморфізму перетворення простору і результати розв'язків, які в сукупності утворюють метод оцінювання тривимірних деформацій Землі. Загальні умови гомеоморфізму перетворень дають змогу оцінювати нелінійні деформації Землі безвідносно до їх масштабу – глобального, регіонального чи локального. У статті акцентовано на спроможності методу виражати жорсткі обертання Землі. Доведено, що саме така ознака деформації асоціюється з кутковими спотвореннями системи координат. Наведено аналітичні вираження абсолютних показників куткових спотворень системи координат і напрямів осей координат деформованої системи відносно початкового положення в ортогональному стані. Метод може бути рекомендований для моніторингу умовних статичних і, найбільшою мірою, кінематичних референціальних систем національного і регіонального масштабів на територіях з підвищеною активністю геодинамічних процесів.

Ключові слова: референціальна система; система координат; деформація; жорсткі обертання Землі; GNSS.

Рис.: 2. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Встановлення відлікових систем у геодезії завжди належало до розряду проблем, які потребували першочергового вирішення. Запровадження у геодезичну практику супутникових навігаційних технологій та систем позиціонування зумовило переосмислення традиційних підходів до вирішення проблеми. Це пов'язано із введенням у практику референціальних систем, які внаслідок впливу різних факторів піддаються змінам у часі з погляду порушення їх фундаментальних геометричних та фізичних умов.

Постановка проблеми. Загалом, неможливо вибрати систему відліку, яка була б жорстко пов'язана з тілом планети й залишалась незмінною в умовах, коли остання деформується. Здебільшого на практиці використовують модель відлікової системи, яка ґрунтується на малих змінах положення точок тіла відносно неї. Така модель реалізовується під умовою NNR (no-net-rotation). Вона накладає обмеження на систему з погляду прирівнювання нульового сумарного моменту імпульсу всіх точок поверхні планети, які об'єднані у межах літосферних плит, і моменту імпульсу Землі в цілому. Таке обмеження зумовлює врахування лише середніх інтегральних показників зміщення, зміни масштабу й обертань системи відносно її стану на фіксовану референціальну епоху t_0 . За такої концепції деформації земної поверхні не беруться до уваги з тієї причини, що їх швидкість не дає внеску у відносний або деформаційний момент імпульсу. Модель системи, обмежену такими умовами, вважають практично допустимою і називають системою Тіссерана [1]. Саме таку модель взято за основу створення умовних статичних референціальних систем типу CTS (Conventional Terrestrial System), зокрема, глобальної ITRS (International Terrestrial Reference System) чи похідних від неї регіональних систем, зокрема європейської ETRS.

Розвиток супутникових навігаційних технологій підтвердив гіпотезу Альфреда Вегенера про нерівномірність деформації земної поверхні внаслідок складних процесів глибинної динаміки Землі та її поступально-обертового руху в просторі. Це стало можливим завдяки накопиченню даних моніторингу Землі, найбільшою мірою, методом GNSS.

Накопичені дані та їх аналіз спричинили відмовлення від гіпотези твердої оболонки Землі на користь динамічної концепції тектоніки літосферних плит. Диференціація планети на плити стала можливою за ознакою різнонаправлених зміщень станцій GNSS. Теорія тектоніки плит стала визначальною і концептуально вплинула на формування проблем не тільки сучасної геодинаміки, але й геодезії. На цій основі намітивсь новий напрям сучасної геодезії, пов'язаний зі створенням референсних систем кінематичного типу. Якщо у статичних системах рухи і деформації плит зумовлюють необхідність їх прив'язки до певної епохи t_0 , то в кінематичних системах поняття вихідних статичних дат взагалі не береться до уваги. Натомість користувачам пропонується використовувати координати пунктів у системі кінематичних дат безвідносно до їх фіксації на ту чи іншу референсну епоху.

Аналіз досліджень проблеми. ITRS, як глобальна система типу CTS, пов'язана з планетою таким чином, що рухається, обертається та зазнає масштабування разом з нею. Моніторинг системи здійснюється методами космічної геодезії сумісно з моніторингом Землі. За результатами моніторингу встановлюються ITRF-реалізації (International Terrestrial Reference Frame), які відіграють роль вихідних геодезичних дат і відображають стан системи на епоху t_0 . Умови статичної моделі референсної системи відносно її реалізації у момент t_0 з часом порушуються. Це є приводом для періодичного оновлення реалізацій. Новітні розв'язки (реалізації) системи визначаються з урахуванням значущості змін, що відбулися, і враховуються параметрами переходу (трансформації). Беруться до уваги, зокрема, зміщення T_x, T_y, T_z початку відліку у відношенні до попередньої реалізації, масштабний фактор D , зміна орієнтування осей координат R_x, R_y, R_z та швидкості усіх цих параметрів. Розв'язки ITRF досягають використанням лінеаризованої форми чотирнадцятипараметричного перетворення Гельмерта. Параметри R_x, R_y, R_z , як середні інтегральні показники обертання осей координат, не передбачають диференціації їх значень з погляду спотворення ортогональності системи координат. Це є наслідком використання умови відсутності глобальних залишкових обертань системи відносно горизонтальних тектонічних рухів у масштабі всієї планети [1; 2].

Носіями кінематичних систем є GNSS-станції, координати яких постійно змінюються. Зміни залежать від інтенсивності тектонічних процесів. Використання кінематичних систем надзвичайно актуальне для територій локального чи регіонального масштабів з явно вираженим аномальним характером процесів передусім локалізованих у межах літосферних плит або у межах їх взаємодії. Наразі у геодезичній спільноті не існує уніфікованого алгоритму встановлення кінематичних систем. У кожному окремому випадку беруть до уваги специфічну для території стратегію врахування впливу тектоніки плит. Враховуючи, що система відліку має бути прив'язана до тіла планети або його частини, ігнорування перебігу тектонічних процесів на практиці призводить і призводитиме до суттєвого послаблення геодезичної інфраструктури. За рахунок цього з часом проявиться вплив неточності геодезичної базової інформації [3].

Порушення умов створення з погляду врахування тектонічних процесів має наслідком деформацію відлікової системи. Саме деформації референсних систем набувають зараз неабиякого науково-практичного інтересу. Це пов'язано з оцінюванням деформацій не тільки систем типу CTS, як кінематичних систем. Вони мають забезпечити стабільність земної координатної системи передусім з погляду врахування впливу тектонічних процесів локального масштабу. Показовими з цього погляду є вже використовувані кінематичні системи NZGD2000 [4], DRF-Iceland [5], ATRF [6]. Активно дискутується потреба використання кінематичних систем для території Скандинавського півострова [7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Функціонування існуючих та створення нових референцних систем немислиме без врахування їх взаємозв'язку з проблемою об'єктивного оцінювання деформації Землі. Аналіз вирішення цієї проблеми показав [8; 9], що використовувана теоретична основа і методи оцінювання деформації не відповідають потенційному інформаційному ресурсові GNSS-даних. Аргументації цьому висновкові наступні [8].

1. Дослідження проблеми ґрунтуються на моделі лінійно-однорідної нескінченно малої деформації суцільного середовища математичної теорії пружності. Така модель спрощена характеризує лише лінійну складову деформації. Нелінійні моделі у дослідницькій практиці не застосовуються.

2. Використовувана модель реалізується методом скінченних елементів. Розділення земної поверхні на скінченні елементи здебільшого виконується формально без якого-небудь обґрунтування відповідності реальної деформації умовам лінійної моделі. Це зумовлює сумнівну достовірність одержаних оцінок деформації.

3. Оцінки деформації відносять до модельних геодезичних поверхонь або барицентрів скінченних елементів, але не до топографічної поверхні, де досліджувані процеси виражаються і підлягають безпосередньому моніторингу методом GNSS.

4. У дослідницькій практиці не застосовуються методи оцінювання тривимірних деформацій Землі глобального (планетарного) масштабу.

У праці [8] запропоновано метод вирішення проблеми оцінювання тривимірних деформацій Землі на узагальнюючій теоретичній основі з перспективою врахування нелінійних ефектів деформації. Проблему розглянуто з позицій теорії перетворення образів ріманового простору в формі складних диффеоморфних многовидів [10]. Складним многовидом обрано евклідовий простір E_3 , який дотичний до кожної точки ріманового простору в формі локальних ортонормованих координатних базисів у декартовій системі. Такий вибір умотивовано тим, що система, у якій здійснюється моніторинг координат методом GNSS, за своєю суттю є декартова. Головною визначено гіпотезу, що перетворення простору мають геофізичне походження та ідентифікуються як деформації.

Мета дослідження. Беручи за основу результати досліджень [8], розкриємо взаємозв'язки характеристик тривимірних деформацій Землі і показників деформацій сучасних земних референцних систем, якими визначається порушення їх фундаментальних геометричних умов. У цій частині досліджень розкриємо перспективи оцінювання кутових спотворень референцних систем.

Виклад основного матеріалу. Обґрунтування теоретичного підходу. Перетворення (або відображення) простору – це процес трансформації кожної точки M простору у відповідну їй точку M' . M' ідентифікується як відображення M . Зазначене відображення завжди однозначне, якщо вській точці M простору відповідає тільки одна точка M' . Сукупність N точок M_i ($i = \overline{1, N}$) окремої частини або й усього простору, які підлягають трансформації, формують відображувану область Δ . Сукупність точок M'_i , котрі відповідають M_i , формують область відображення Δ' . Допустимо, у тривимірному просторі встановлено систему декартових координат x, y, z . Тоді за умови, що область Δ замкнена і неперервна, вона цілком окреслюється точками $M_i(x_i, y_i, z_i)$. Якщо Δ відобразилась на Δ' таким чином, що остання залишилась замкненою неперервною, то вона цілком окреслюється точками $M'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$. У такій постановці проблеми загальна теорія перетворення простору не висуває жодних умов щодо розмірів та геометричних

форм областей Δ і Δ' [10]. На таких підставах областю Δ можна вважати топографічну поверхню незалежно від її масштабу – глобального, регіонального чи локального.

Припустимо, що координати $x_i = X_i^1$, $y_i = X_i^2$, $z_i = X_i^3$ точок M_i задовольняють умови параметризації Землі прямокутною декартовою системою, а точки M_i – це GNSS-станції, що розташовані на топографічній поверхні. Якщо координати $x'_i = X_i'^1$, $y'_i = X_i'^2$, $z'_i = X_i'^3$ визначають положення відображених точок M'_i області Δ' , то перетворення Δ у Δ' завжди можна відобразити рівняннями

$$\left. \begin{aligned} X'^1 &= u(X^1, X^2, X^3) \\ X'^2 &= v(X^1, X^2, X^3) \\ X'^3 &= w(X^1, X^2, X^3) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Згідно з загальною теорією, базисні функції перетворення (1) повинні бути однозначними, неперервними та диференційованими, що в сукупності складає умову гомеоморфізму перетворень. Але ці умови не обмежують аналітичних форм функцій. Це дає змогу відображати перетворення тими чи іншими гладкими або кусково-гладкими функціями, які можуть бути встановлені за різницями $X_i'^k - X_i^k$ ($k = \overline{1,3}$). Це розкриває перспективу передавати нелінійні закономірності перетворень [10].

Практично такий підхід можна реалізувати за сукупністю емпіричних значень координат GNSS-станцій шляхом побудови емпіричних формул з використанням, наприклад, методу найменших квадратів. У розрізі вирішуваного завдання доцільно використати властивості загальних гармонічних поліномів $u_n(x, y, z) = \sum_{p+q+r=n} a_{pqr} x^p y^q z^r$ степені n , як це розкрито у праці [8]. Розв'язок досягається наближенням лінійної комбінації системи трьох таких осцилюючих функцій на заданій сукупності емпіричних значень координат. Підвищуючи степінь кожної з таких функцій, можна досягнути оптимальної детальності покриття емпіричних даних під умовою найкращої точності апроксимації. Разом з побудовою оптимальних емпіричних формул це дає змогу оцінити ступінь наближення емпіричного розв'язку до строгого на умовах гомеоморфізму. Одержана у підсумку система трьох емпіричних формул генерує функціональну модель деформації.

У початковому стані на момент часу t_0 системі координат $x_i = X_i^1$, $y_i = X_i^2$, $z_i = X_i^3$ точок M_i області Δ властива ознака ортогональності, тому її метрику визначає лінійний елемент

$$ds^2 = \delta_{ij} dX^i dX^j \quad (2)$$

з метричними коефіцієнтами $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$. Для відображення ds' лінійного елемента ds , що відповідає області Δ' в момент часу $t_1 = t_0 + dt$,

$$ds'^2 = e_{ij} dX^i dX^j. \quad (3)$$

Метричними коефіцієнтами e_{ij} формується симетрична матриця, яку іменують метричним двовалентним коваріантним тензором перетворення простору [10]:

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{12} & e_{22} & e_{23} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

За гіпотези геофізичного походження змін метричних властивостей простору, тензор (4) є тензором деформації. Як геометричний образ многовида, тензор є носієм інформації про зміни метрики простору і за посередництва власних інваріантів спроможний передавати їх ознаки числовими характеристиками. Використовуючи методи проєктивно-диференціальної геометрії та прийоми описування змін ріманової метрики, одержано аналітичні вираження характеристик деформації різного геометричного змісту [8].

Оцінки кутових спотворень референціальних систем. Згідно з теорією тензорного аналізу, тензор e_{ij} спроможний передавати інформацію як про деформування простору в межах області Δ , так і про деформацію системи координат, якою ця область параметризована. Якщо протягом dt відбулись зміни метричних властивостей області Δ такі, що $ds \neq ds'$, то крім переміщення початку відліку і зміни масштабу системи X^i ($i = \overline{1,3}$) існують ризики деформацій, пов'язаних зі зміною орієнтування осей координат та (або) порушенням їх ортогональності відносно початкового стану з наслідками трансформування в косокутну декартову систему. Засвідчити або, так само, спростувати таку гіпотезу можна емпірично на підставі геометричних аргументацій, як це подано у працях [8, 10, 11].

Проекції лінійного елемента ds на осі системи координат довільного тривимірного простору виражаються добутками $ds^{(i)} = \sqrt{g_{ii}}dX^i$, що впливає з його метрики g_{ij} й відповідної квадратичної форми $ds^2 = g_{ij}dX^i dX^j$. Індекс (i) в $ds^{(i)}$ ідентифікує приналежність проєкції до осі X^i . Кут η_{ij} між парою проєкцій $ds^{(i)}$ та $ds^{(j)}$, як це показано на рис. 1, виражає відношення [10]

$$\cos \eta_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sqrt{g_{ii}g_{jj}}}. \tag{5}$$

Беручи до уваги ортогональність осей системи координат X^i в початковий момент часу t_0 , метричні коефіцієнти $g_{ij} = \delta_{ij}$ і з формули (5) слідує, що $\eta_{ij}^{(0)} = 90^\circ$. Індекс (0) символізує приналежність кутів η_{ij} моменту часу t_0 .

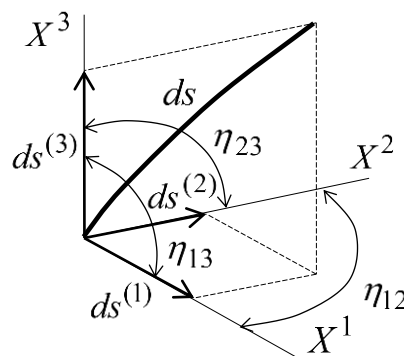


Рис 1. Кути між проєкціями дуги ds на осі координат [11]

Допустимо, протягом якогось часу dt відбулись певні зміни метричних властивостей простору. Тоді в момент $t_1 = t_0 + dt$ метрику простору визначатиме тензор $g_{ij} = e_{ij}$. Якщо при $i \neq j$ метричні коефіцієнти $e_{ij} \neq 0$, то кути $\eta_{ij}^{(1)} \neq 90^\circ$, що також слідує з фор-

мули (5). Індекс (1) символізує приналежність кутів η_{ij} моменту часу t_1 . Одержаний результат засвідчує наступне: кути $\eta_{ij}^{(1)}$ – це абсолютні міри ймовірної косокутної декартової системи координат. Їх виражає формула

$$\cos \eta_{ij}^{(1)} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{e_{ii}e_{jj}}} . \tag{6}$$

Характеристиками кутових спотворень між парами осей координат $X^i X^j$ у сенсі порушення їх ортогональності є кути $\varepsilon_{ij}^{(1)} = 90^\circ - \eta_{ij}^{(1)}$. Для їх абсолютного вираження можна використати формулу

$$\sin \varepsilon_{ij}^{(1)} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{e_{ii}e_{jj}}} . \tag{7}$$

Формули (6) та (7) показують, що ступінь порушення ортогональності декартової системи координат визначають як недіагональні метричні коефіцієнти тензора e_{ij} , так і діагональні коефіцієнти e_{ii} . Останні водночас асоціюються з абсолютними лінійними розширеннями простору в напрямках осей координат і визначають зміну масштабу системи. Беручи до уваги, що система прив’язана до області Δ , кути $\varepsilon_{ij}^{(1)}$ виражають також її жорсткі обертання у напрямках між парами осей $X^i X^j$. Отже, оцінювання ймовірної втрати ортогональності системи координат можна реалізувати шляхом застосування кутових мір $\eta_{ij}^{(1)}$ та $\varepsilon_{ij}^{(1)}$ на засадах теорії тензорного аналізу [10].

Дослідимо проблему з іншого погляду – виразимо напрями осей деформованої системи відносно їх початкового положення. Для цього скористаємось результатами розв’язків у проєкціях лінійного елемента ds на координатні площини, як це розкрито у праці [11]. Розв’язки досягнуто на засадах положень теорії відображення поверхонь, як вони реалізуються, наприклад, у математичній картографії.

Розглянемо проєкцію ds у площині екватора $x^1 O x^2$. Тут $dX^3 = 0$, тому вираження квадратичних форм (2) і (3) спрощуються до вигляду $ds_{12}^2 = \delta_{ij} dX^i dX^j$ та $ds_{12}^2 = e_{ij} dX^i dX^j$ ($i, j = 1, 2$).

Коефіцієнти тензора $e_{ij} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{12} & e_{22} \end{pmatrix}$ розкривають вирази

$$e_{11} = \left(\frac{\partial u}{\partial X^1} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial X^1} \right)^2, \quad e_{22} = \left(\frac{\partial u}{\partial X^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial X^2} \right)^2 \quad \text{та} \quad e_{12} = \frac{\partial u}{\partial X^1} \frac{\partial u}{\partial X^2} + \frac{\partial v}{\partial X^1} \frac{\partial v}{\partial X^2} .$$

Останні є наслідком повних диференціалів функцій (1) на площині $X^1 O X^2$: $dX^{i1} = \frac{\partial u}{\partial X^1} dX^1 + \frac{\partial u}{\partial X^2} dX^2$;

$$dX^{i2} = \frac{\partial v}{\partial X^1} dX^1 + \frac{\partial v}{\partial X^2} dX^2 .$$

Якщо внаслідок деформації вісь X^1 відобразилась проєкцією X^{i1} , то її напрям відносно X^1 задає кут $\psi_{12}^{(1)}$ (див. рис. 2.а). Так само, напрям проєкції X^{i2}

осі X^2 задає кут $\chi_{12}^{(1)}$. Індекс (1) тут символізує приналежність кутів деформованому стану системи координат на момент часу t_1 . Явні вирази напрямів $\psi_{12}^{(1)}$ і $\chi_{12}^{(1)}$ в [11] одержано з

відношення диференціалів проєкцій осей на площині відображення в момент t_1 , які виражено в системі координат відображуваної площини станом на початковий момент t_0 :

$$\left. \frac{dX'^2}{dX'^1} \right|_{\substack{dX^3=0 \\ X^2=const}} = \left(\frac{\partial v}{\partial X^1} \right) / \left(\frac{\partial u}{\partial X^1} \right) = tg \psi_{12}^{(1)}; \quad (8)$$

$$\left. \frac{dX'^2}{dX'^1} \right|_{\substack{dX^3=0 \\ X^1=const}} = \left(\frac{\partial v}{\partial X^2} \right) / \left(\frac{\partial u}{\partial X^2} \right) = tg \chi_{12}^{(1)}. \quad (9)$$

Для різниці $\chi_{12}^{(1)} - \psi_{12}^{(1)} = \eta_{12}^{(1)}$ одержуємо: $tg \eta_{12}^{(1)} = \frac{\frac{\partial u}{\partial X^1} \frac{\partial v}{\partial X^2} - \frac{\partial v}{\partial X^1} \frac{\partial u}{\partial X^2}}{\frac{\partial u}{\partial X^1} \frac{\partial u}{\partial X^2} + \frac{\partial v}{\partial X^1} \frac{\partial v}{\partial X^2}}$. Тут чисельник

– це детермінант $e_{11}e_{22} - e_{12}^2 = \det e_{ij}$ тензора e_{ij} ($i, j = 1, 2$) на площині X^1OX^2 , тому

$$tg \eta_{12}^{(1)} = \frac{\sqrt{\det e_{ij}}}{e_{12}}, \quad (10)$$

$$ctg \varepsilon_{12}^{(1)} = \frac{\sqrt{\det e_{ij}}}{e_{12}}. \quad (11)$$

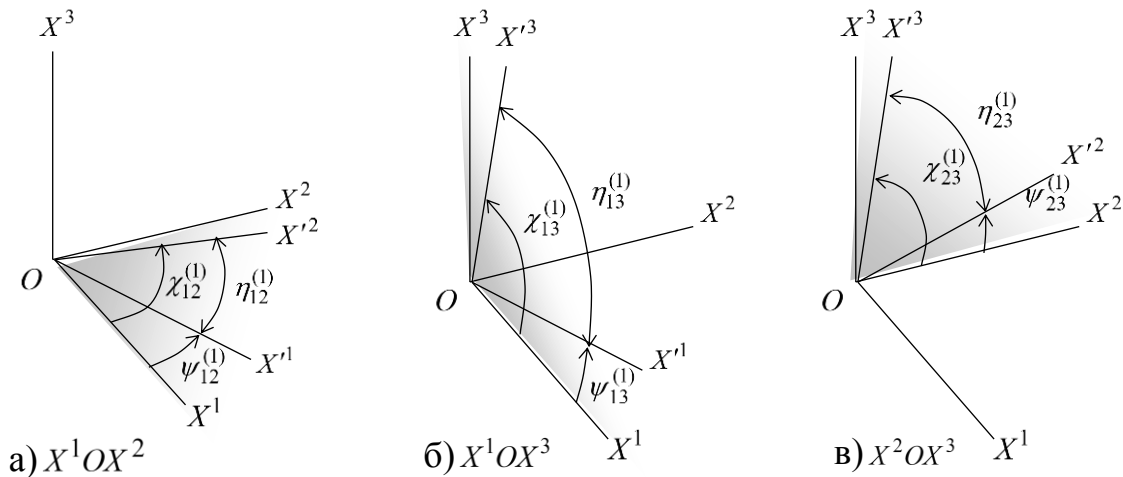


Рис. 2. Напрями осей деформованої системи в проєкціях на координатні площини [11]

Дослідженнями [11] доведено, що вираження кута $\eta_{12}^{(1)}$ за формулами (6) та (10) і кута $\varepsilon_{12}^{(1)}$ за формулами (7) та (11) відповідно тотожні. Цим посвідчено істинність формул (8) та (9) щодо їх спроможності оцінювати напрями $\psi_{12}^{(1)}$ та $\chi_{12}^{(1)}$ проєкцій X'^1 та X'^2 осей координат деформованої системи відносно їх початкового положення X^1 та X^2 на площині X^1OX^2 .

На такій же основі реалізовано розв'язки й отримано вираження напрямів $\psi^{(1)}$, $\chi^{(1)}$ в проєкціях на інші координатні площини системи X^i ($i = \overline{1,3}$) [11]. Зокрема, у проєкції на площину X^1OX^3 (див. рис. 2, б)

$$\left. \frac{dX'^3}{dX'^1} \right|_{\substack{dX^2=0 \\ X^3=const}} = \left(\frac{\partial w}{\partial X^1} \right) / \left(\frac{\partial u}{\partial X^1} \right) = \operatorname{tg} \psi_{13}^{(1)}, \quad (12)$$

$$\left. \frac{dX'^3}{dX'^1} \right|_{\substack{dX^2=0 \\ X^1=const}} = \left(\frac{\partial w}{\partial X^3} \right) / \left(\frac{\partial u}{\partial X^3} \right) = \operatorname{tg} \chi_{13}^{(1)} \quad (13)$$

та в проекції на площину X^2OX^3 (див. рис. 2, в)

$$\left. \frac{dX'^3}{dX'^2} \right|_{\substack{dX^1=0 \\ X^3=const}} = \left(\frac{\partial w}{\partial X^2} \right) / \left(\frac{\partial v}{\partial X^2} \right) = \operatorname{tg} \psi_{23}^{(1)} \quad (14)$$

$$\left. \frac{dX'^3}{dX'^2} \right|_{\substack{dX^1=0 \\ X^2=const}} = \left(\frac{\partial w}{\partial X^3} \right) / \left(\frac{\partial v}{\partial X^3} \right) = \operatorname{tg} \chi_{23}^{(1)}. \quad (15)$$

За геометричним змістом кути $\psi_{ij}^{(1)}$ та $\chi_{ij}^{(1)}$ є прямими аналогами кутовим координатам геоцентричної полярної системи. Так, кути $\psi_{12}^{(1)}$, $\chi_{12}^{(1)}$ – це довготи λ_x^{def} , λ_y^{def} напрямів осей координат деформованої системи $X'^1 = x'$ та $X'^2 = y'$ у площині екватора відносно площини нульового меридіана на момент t_0 . Кути $\psi_{13}^{(1)}$, $\chi_{13}^{(1)}$ – це широти φ_x^{def} , φ_z^{def} напрямів осей $X'^1 = x'$ та $X'^3 = z'$ у площині нульового меридіана, а $\psi_{23}^{(1)}$, $\chi_{23}^{(1)}$ – широти φ_y^{def} , φ_z^{def} напрямів осей $X'^2 = y'$ та $X'^3 = z'$ у площині меридіана на довготі $\lambda = 90^\circ$ відносно площини екватора у початковому стані.

Різниці $\lambda_x^{def} - \lambda_x$, $\lambda_y^{def} - \lambda_y$ (при $\lambda_x = 0^\circ$, $\lambda_y = 90^\circ$), $\varphi_x^{def} - \varphi_x$, $\varphi_z^{def} - \varphi_z$ (при $\varphi_x = 0^\circ$, $\varphi_z = \pm 90^\circ$) та $\varphi_y^{def} - \varphi_y$, $\varphi_z^{def} - \varphi_z$ (при $\varphi_y = 0^\circ$, $\varphi_z = \pm 90^\circ$) характеризують відхилення осей координат від їх початкового положення на момент t_0 . За своїм змістом саме ці величини є аналогами показникам зміни орієнтування осей координат R_x, R_y, R_z , якими формується матриця обертання R у трансформаціях референціальних систем. Важлива ремарка: використання лінеаризованої форми чотирнадцятипараметричного перетворення Гельмерта для трансформацій системи ITRS не передбачає диференціації кутів повороту осей координат з погляду спотворення їх ортогональності.

Представлені вище результати розв'язків розкривають перспективу числового оцінювання кутових спотворень системи координат, як геометричної основи референціальних систем. Результати оцінювання можуть бути досягнуті виключно завдяки використанню GNSS-даних. Одержані аналітичні вираження можуть бути використані як додатковий інструмент досліджень сучасних референціальних систем усіх типів у їх взаємозв'язку з геодинамікою. Якщо такі дослідження можуть складати предмет дискусій з погляду їх використання для систем типу CTS, то у задачах моніторингу референціальних систем кінематичного типу вони мають безсумнівну практичну значущість. В реаліях створюваних

кінематичних систем за умови суттєвого вираження кутових спотворень формування матриці обертання R повинно виконуватись за відхиленнями осей координат на диференційованій основі.

Одержані аналітичні вираження кутових спотворень системи координат мають перспективу ще й з тієї погляду, що їх подано у загальному вигляді, який здатний передавати деформації нелінійного характеру, наскільки їх можна врахувати базисними функціями моделі (1). Ефективність нелінійних моделей деформації Землі сьогодні очевидна, навіть якщо взяти до уваги наслідки їх використання, наприклад, при розв'язку реалізації ITRF2014 системи ITRS: «генералізація розв'язку ITRF2014 з розширеним моделюванням нелінійних рухів станцій забезпечила значне підвищення його точності порівняно з ITRF2008» [12].

За результатами проведених досліджень можна сформулювати наступні головні **висновки**.

1. Проблема оцінювання порушень геометричних умов створення референціальних систем розглянута у взаємозв'язку з проблемою оцінювання тривимірних деформацій Землі. Пропонується метод вирішення проблеми за GNSS-даними на основі теорії перетворення образів ріманового простору в формі складних диффеоморфних многовидів, зокрема, дотичного евклідового простору з параметризацією прямокутною декартовою системою координат. Саме така система координат є геометричною основою сучасних референціальних систем.

2. У представленій тут частині досліджень наголошено на спроможності розробленого методу виражати жорсткі обертання Землі. Доведено, що саме така ознака деформації асоціюється з кутовими спотвореннями системи координат. Наведено аналітичні вираження абсолютних показників кутових спотворень системи координат. За змістом вони є прямими аналогами показникам зміни орієнтування осей координат, якими формується матриця обертання у трансформаціях референціальних систем. Також наведено аналітичні вираження напрямів осей координат деформованої системи відносно початкового положення в ортогональному стані.

3. Властивість гомеоморфізму перетворень замкнених неперервних областей простору забезпечує оцінювання ймовірних нелінійних деформацій Землі з віднесенням обчислених характеристик до топографічної поверхні, яка підлягає безпосередньому моніторингу методом GNSS. Використана теоретична основа не накладає жодних обмежень на масштаб топографічної поверхні – глобальний, регіональний чи локальний. Це розкриває перспективу використовувати розроблений метод для моніторингу референціальних систем безвідносно до їх масштабів. Метод може бути рекомендований як додатковий інструмент моніторингу умовних статичних і, найбільшою мірою, кінематичних референціальних систем регіонального і національного масштабів на територіях з підвищеною активністю геодинамічних процесів.

Список використаних джерел

1. Moritz, H. Earth's Rotation. Theory and estimations / H. Moritz, I. I. Muller. – New York : Ungar, 1987. – 617 p.
2. IERS Conventions 2010. IERS Technical Note [Electronic resource] / eds. G. Petit, B. Luzum. – Frankfurt am Main : Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, 2010. – 181 p. – Access mode: http://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechNote36/tn36_031.pdf.
3. Марченко, О. М. Референціальні системи в геодезії / О. М. Марченко, К. Р. Третяк, Н. П. Ярема. – Львів : Львівська політехніка, 2018. – 244 с.
4. From geophysics to geodetic datum: updating the NZGD2000 deformation model / C. Crook, N. Donnelly, J. Beavan, C. Pearson // New Zealand Journal of Geology and Geophysics. – 2016. – № 59 (1). – P. 22-32. doi.org/10.1080/00288306.2015.1100641.

5. Dynamic reference frames. A case study in Iceland [Electronic resource] / K. Evers, M. Lidberg, P. Häkli, H. P. Kierulf, G. Valsson // *Reference Frames in Practice : FIG Symposia (Istanbul, May 4th, 2018)*. – Access mode: https://www.fig.net/fig2018/rfip/6_RFIP/Istanbul_KristianEvers.pdf.
6. Australian Terrestrial Reference Frame ATRF [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.icsm.gov.au/australian-terrestrial-reference-frame>.
7. Poutanen, M. Future of National Reference Frames – from static to kinematic? / M. Poutanen, P. Häkli // *Geodesy and Cartography*. – 2018. – № 67 (1). – P. 117-129. doi.org/10.24425/118697.
8. Тадеєв, О. Перспективи оцінювання тривимірних деформацій Землі за даними глобальних навігаційних супутникових систем / О. Тадеєв // *Технічні науки і технології*. – 2023. – № 4 (34). – С. 265-276. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-265-276.
9. Тадеєв, О. А. Проблеми та перспективи оцінювання деформаційних полів Землі за геодезичними даними / О. А. Тадеєв // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. – 2015. – № 82. – С. 73-94. doi.org/10.23939/istcgcap2015.02.073.
10. Sokolnikoff, I. S. *Tensor analysis. Theory and applications to geometry and mechanics of continua* / I. S. Sokolnikoff. – New York, London, Sydney : John Wiley & Sons, 1964. – 361 p.
11. Tadyeyev, O. Evaluation of three-dimensional deformation fields of the Earth by methods of the projective differential geometry. Rigid rotations of the Earth / O. Tadyeyev // *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. – 2016. – № 84. – P. 25-38. doi.org/10.23939/istcgcap2016.02.025.
12. ITRF2014: a new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions / Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Metivier, X. Collilieux // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2016. – № 121 (B8). – P. 6109-6131. DOI: 10.1002/2016JB013098.

References

1. Moritz, H., Muller, I.I. (1987). *Earth's Rotation. Theory and estimations*. New York, Ungar.
2. IERS Conventions (2010). *IERS Technical Note; 36* / eds. G. Petit, B. Luzum. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie. http://www.iers.org/SharedDocs/Publicationen/EN/IERS/Publications/tn/TechNote36/tn36_031.pdf.
3. Marchenko, O.M., Tretyak, K.R., Yarema, N.P. (2018). *Referentsni systemy v heodezii [Reference systems in geodesy]*. Lviv Polytechnic.
4. Crook, C., Donnelly, N., Beavan, J., Pearson, C. (2016). From geophysics to geodetic datum: updating the NZGD2000 deformation model. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 59(1), 22-32. doi.org/10.1080/00288306.2015.1100641.
5. Evers, K., Lidberg, M., Häkli, P., Kierulf, H.P., Valsson, G. (2018). Dynamic reference frames. A case study in Iceland. In: *Reference Frames in Practice*. FIG Symposia, Istanbul, May 4th, 2018. https://www.fig.net/fig2018/rfip/6_RFIP/Istanbul_KristianEvers.pdf.
6. Australian Terrestrial Reference Frame ATRF. <https://www.icsm.gov.au/australian-terrestrial-reference-frame>.
7. Poutanen, M., Häkli, P. (2018). Future of National Reference Frames – from static to kinematic? *Geodesy and Cartography*, 67(1), 117-129. doi.org/10.24425/118697.
8. Tadyeyev, O. (2023). Prospects for evaluation of three-dimensional deformations of the Earth based on data from global navigation satellite systems. *Technical sciences and technologies*, 4(34), 265-276. doi:10.25140/2411-5363-2023-4(34)-265-276.
9. Tadyeyev, O.A. (2015). Problems and prospects of evaluation the deformation fields of the Earth based on geodetic data. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 82, 73-94. doi.org/10.23939/istcgcap2015.02.073.
10. Sokolnikoff, I.S. (1964). *Tensor analysis. Theory and applications to geometry and mechanics of continua*. New York, London, Sydney, John Wiley & Sons.
11. Tadyeyev, O. (2016). Evaluation of three-dimensional deformation fields of the Earth by methods of the projective differential geometry. Rigid rotations of the Earth. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 84, 25-38. doi.org/10.23939/istcgcap2016.02.025.
12. Altamimi, Z., Rebischung, P., Metivier, L., Collilieux, X. (2016). ITRF2014: a new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121 (B8), 6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098.

Отримано 06.02.2024

Oleksandr Tadyeyev

PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Cartography
National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine)

E-mail: o.a.tadyeyev@nuwm.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4566-0160>. **ResearcherID:** B-6081-2019

**TO THE PROBLEM OF EVALUATION THE ANGULAR DISTORTIONS
OF MODERN EARTH'S REFERENCE SYSTEMS**

The presented in the article information is of a scientific and methodical character. The generalizing approach and the method for solving the problem of evaluation the angular distortions of modern Earth's reference systems, which are caused by the influence of geodynamic processes, are proposed. The method is intended for use of Earth monitoring data using global navigation satellite systems GNSS. The method is based on the theory of transformation of images of the Riemannian space in the form of complex diffeomorphic manifolds. The complex manifold is the tangent Euclidean space, which is parameterized by a rectangular Cartesian coordinate system. This choice is justified by the fact that this parameterization system is the geometric basis of modern reference systems and is subject to monitoring by the GNSS method. The problem of evaluation the distortion of reference systems is considered in relationship with the problem of evaluation the deformations of the Earth. The article provides theoretical justifications, the algorithm for creating the functional model based on the homeomorphism of the transformation of space, and the results of solutions, which together form a method for evaluation of three-dimensional deformations of the Earth. The general conditions of homeomorphism of transformations make it possible to evaluate the nonlinear deformations of the Earth regardless of their scale - global, regional or local. The article focuses on the ability of the method to express the rigid rotation of the Earth. It has been proven that exactly this sign of the deformation is associated with angular distortions of the coordinate system. Analytical expressions of the absolute indicators of angular distortions of the coordinate system for arbitrarily chosen epochs of observations relative to the initial orthogonal state are derived. The method can be recommended for monitoring of the conventional static and, to the greatest extent, the kinematic reference systems of national and regional scales in territories with increased activity of geodynamic processes.

Keywords: reference system; coordinate system; deformation; rigid rotation of the Earth; GNSS.

Fig.: 2. **References:** 12.

Віталій Гусев¹, Тетяна Нікіфорова²

¹аспірант кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)
E-mail: husevitalii@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6813-9824>

²доктор технічних наук, професор кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)
E-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0688-2759>

**АНАЛІЗ ФАЙЛІВ У ФОРМАТІ STL, ЯК ОСНОВА МОДЕЛЮВАННЯ
ДЛЯ 3D-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Це дослідження спрямоване на аналіз файлів у форматі STL у світлі збільшення адитивного виробництва та прогресу цифрових технологій у будівельній сфері. Метою роботи є надання всебічного огляду основної інформації, пов'язаної з використанням цього формату, що включає методи обчислення площі та об'єму сітки STL. Виявлення та аналіз типових помилок, які можуть виникати під час роботи з файлами цього формату, та визначення ключових критеріїв для оцінки геометричної якості сітки. Ці технології часто користуються форматом файлів STL для збереження геометрії об'єктів. Після визначення цього формату надається вичерпний опис важливої інформації, пов'язаної з його використанням. Далі розглянуто методи обчислення площі сітки STL та об'єму, що включений у нього. Окреслюються типові помилки та ключові критерії, які можна застосовувати для оцінки геометричної якості сітки STL. На закінчення надаються альтернативні варіанти подолання деяких недоліків формату STL.

Ключові слова: 3-D друк; STL-файли; САПР; 3D-моделювання; формат ASCII; метод поширеного наплавлення.
Рис.: 12.. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Останні роки свідчать про революцію у промисловому виробництві, завдяки поширенню технологій адитивного виробництва та цифровізації в будівельній сфері. У цьому контексті формати файлів, такі як STL, стали невід'ємною частиною інженерних процесів. Актуальність дослідження геометричних форматів, зокрема STL, впливає з їх вирішальної ролі в цифровому виробництві та стрімкому розвитку застосування адитивних технологій.

Важливість формату STL в адитивному виробництві базується на його здатності описувати геометрію об'єктів з високою точністю та відносною простотою використання. Він дозволяє представляти тривимірні моделі об'єктів у вигляді набору пов'язаних трикутників, що робить його ідеальним для передачі інформації між різними програмами та пристроями, що використовуються в процесі 3D-друку та моделювання.

Дослідження методів розрахунку площі мережі STL та об'єму всередині неї, мають важливе значення для забезпечення якості та точності виготовлених деталей. Точність цих розрахунків безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту, його функціональність та міцність. Тому розробка ефективних алгоритмів для розрахунку цих параметрів є пріоритетною задачею для інженерів та дослідників.

Однак, використання формату STL також супроводжується рядом обмежень та недоліків. Типові помилки, такі як наявність неправильно орієнтованих трикутників або недостатня роздільна здатність моделі, можуть призвести до дефектів у кінцевому виробі. Крім того, оцінка геометричної якості мережі STL може бути складною задачею через відсутність універсальних критеріїв та стандартів.

У зв'язку з цими викликами й потребами виникає необхідність у дослідженні альтернативних форматів або поліпшених методів роботи з STL для подолання його недоліків та оптимізації процесів адитивного виробництва. Наприклад, розробка нових форматів файлів, здатних більш ефективно описувати складні геометричні форми, або поліпшення алгоритмів обробки та аналізу STL-моделей може значно покращити виробничі процеси та якість кінцевих виробів.

Отже, актуальність досліджень у галузі геометричних форматів, зокрема STL, в адитивному виробництві неперервно зростає разом з розвитком технологій та потребами промисловості. Такі дослідження відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності, точності та якості виробництва в цифрову епоху.

Проводячи дослідження у цій сфері, важливо звернути увагу на кілька ключових напрямів.

По-перше, розробка більш точних і ефективних методів аналізу та обробки файлів STL стає невід'ємною частиною покращення виробничих процесів. Це включає створення алгоритмів для автоматичного виявлення та виправлення помилок у мережах, оптимізацію роздільної здатності моделей для балансування якості та продуктивності, а також покращення алгоритмів розрахунку геометричних параметрів.

По-друге, дослідження нових форматів файлів, які могли б замінити або доповнити STL, є важливим завданням. Нові формати повинні забезпечувати більш гнучке представлення геометричних форм, підтримувати додаткові властивості об'єктів, такі як текстури або кольори, а також забезпечувати кращу сумісність із сучасними програмними засобами та пристроями.

Третім важливим аспектом є розвиток стандартів та рекомендацій щодо використання файлів STL та інших геометричних форматів. Це дозволить створити єдині правила для створення, обміну та обробки 3D-моделей, що підвищить сумісність між різними програмами та пристроями, а також спростить виробничі процеси.

Нарешті, не менш важливим є дослідження застосування нових технологій, таких як штучний інтелект та машинне навчання в обробці файлів STL. Ці методи можуть бути використані для автоматичного аналізу та оптимізації геометричних моделей, виявлення патернів та тенденцій у виробничих даних, а також для створення інноваційних підходів до проектування та виробництва.

Отже, дослідження в області геометричних форматів в адитивному виробництві є важливим завданням, яке має широкі перспективи для покращення виробничих процесів, якості та функціональності кінцевих виробів, а також розвитку інноваційних технологій та методів.

Постановка проблеми. У сучасному адитивному виробництві, такому як 3D-друк, формати файлів відіграють ключову роль у передачі інформації про об'єкт від програмного забезпечення до 3D-принтера. Один із найбільш поширених форматів для передачі геометричних даних об'єктів в адитивному виробництві – формат STL (Stereolithography or Standard Tessellation Language).

Попри широке поширення, формат STL має свої обмеження та недоліки. У зв'язку з цим, виникає необхідність проведення досліджень у області геометричних форматів у адитивному виробництві, особливо в контексті формату STL.

Основні проблеми, які потрібно розглянути та дослідити.

Точність та деталізація. Оцінка можливостей формату STL у передачі геометричної точності та деталізації об'єктів, особливо, при роботі зі складними або великими моделями.

Ефективність зберігання та передачі даних. Аналіз ефективності використання формату STL в контексті обсягу даних, необхідного для опису об'єктів, та можливих методів стиснення даних без втрати якості друку.

Підтримка геометричних особливостей. Дослідження можливостей формату STL обробляти складні геометричні особливості, такі як криволінійні поверхні, порожнини та внутрішні порожнини.

Стійкість до помилок та виправлення дефектів. Аналіз методів виявлення та виправлення помилок у файлах формату STL, таких як некоректні трикутники, самоперетини тощо.

Сумісність та переносимість. Дослідження сумісності формату STL з різними програмними та апаратними платформами, а також можливих обмежень при переміщенні файлів між різними системами.

Мета дослідження полягає в підвищенні якості та ефективності адитивного виробництва шляхом більш повного розуміння обмежень та можливостей формату STL та пропозиції відповідних покращень або альтернативних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Файли у форматі STL, створені системами 3D-моделювання, включають трикутне представлення поверхонь і стали стандартом для введення даних у технологіях швидкого прототипування. У цих технологіях фізичні об'єкти будуються шар за шаром, де кожен шар є двовимірним перерізом тривимірної сітки у форматі STL. У сучасних системах комп'ютерно-автоматизованого проектування (САПР) мозаїка поверхонь часто містить помилки в структурі даних у вигляді прогалів і дірок, що призводить до відкритих петель у поперечних перерізах, які неможливо виготовити як шари.

Проте, таке представлення, у вигляді трикутних сіток, викликає дві основні проблеми. Одне з труднощів полягає в тому, що багато сучасних твердотілих моделей не генерують топологічно правильних мозаїк. Помилки, такі як прогалів та численні грані, призводять до неправильних поперечних перерізів, які не можуть бути виготовлені як шари. Протягом останнього десятиліття багато дослідницьких груп працювали над спрощенням поверхонь та опублікували багато робіт з цієї теми. Алгоритми спрощення сітки зменшують кількість трикутників у даній моделі, мінімально змінюючи її геометричну форму. Інша проблема полягає у високій складності таких сіток. Моделі з мільйонами трикутників часто вимагають більше, ніж доступне сховище та тривалий час обробки. Тому зменшення складності поверхневих сіток є обов'язковою вимогою для роботи з такими представленнями моделей.

Під час тесселяції в сітці дискретизації можуть виникнути численні проблеми з викривленням форми. Тому розробка дискретних алгоритмів для трикутних сіток з метою згладжування форми є ще однією центральною проблемою.

Такі алгоритми використовують результати та методи диференціальної геометрії, варіаційного дизайну поверхні та числового аналізу та знаходять застосування в багатьох областях. Проте дуже мало робіт стосуються виявлення та виправлення топологічних помилок і побудови відповідних структур даних над трикутною сіткою, які також містять топологічну інформацію.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій, вказує на потребу дослідження наступних аспектів загальної проблеми: стандартизація та оптимізація процесів перетворення даних та автоматизація аналізу та оптимізація геометричної якості.

Мета статті полягає у дослідженні файлів у форматі STL у зв'язку з розвитком адитивного виробництва та цифрових технологій у будівельній галузі. Надання вичерпного опису основної інформації, пов'язаної з використанням цього формату, включаючи методи обчислення площі та об'єму сітки STL. В окресленні типових помилок та ключових критеріїв для оцінки геометричної якості сітки. Надання альтернативних варіантів подолання деяких недоліків формату STL.

Виклад основного матеріалу. Розширення файлу STL реалізоване в більшості програмного забезпечення САПР і використовується в різних галузях для моделювання геометричної інформації деталей або форм. Проте, використання файлу STL передбачає розуміння його вмісту, методів утворення сітки та правил генерації файлів, а також можливих кодувань даних [1].

Експлуатація такого типу геометричної моделі є простою. Файл STL містить поверхневі дані САПР, які дискретно описують геометрію поверхні об'єкта у тривимірному просторі. Поверхня, яка визначена у тривимірному просторі, апроксимується набором трикутників, також відомих як грані. Інші геометричні елементи можуть бути використані для дискретизації поверхні (рис. 1); однак лише дискретизація поверхні за допомогою трикутників дозволяє отримати файл у форматі STL.

На практиці, кожна грань (або "facet" англійською) визначається координатами своїх трьох вершин у декартовій системі.



Рис. 1. Візуалізація файлів з дискретними поверхнями

Кожна грань має атрибут напрямку матеріалу, визначений за допомогою орієнтації одиничної нормалі до грані (або "normal" англійською).

Нормаль спрямована зовні від матеріалу (рис. 2).



Рис. 2. Схематизація трикутника у форматі STL з вказаними вершинами та відповідною нормаллю

Нині, крім втрати інформації, що відбувається через відсутність відповідних метаданих у файлі STL, виникає значний розрив у цифровому процесі додавання матеріалу. Фактично, модель, яка створена у CAD 3D, перетворюється на набір трикутних граней (у форматі STL) [2].

Потім, з використанням цього файлу, програмне забезпечення САМ автоматично розбиває об'єкт на тонкі горизонтальні шари, які виготовляються на апаратах для адитивного виробництва (див. рис. 3). Процес перетворення вихідної моделі з CAD у файл STL, який є необхідним для САМ, призводить до цифрового розриву.



Рис. 3. Ілюстрація порушення цифрового ланцюга

Сітку STL формують за допомогою теселяції, що означає розміщення геометричних елементів у формі трикутників на всій поверхні тривимірної моделі таким чином, щоб утворилися безперервні елементи без перекриття чи проміжків [3; 4]. Найбільш поширеним методом для досягнення цього є використання алгоритму Делонея. Цей підхід дозволяє створювати складні тривимірні об'єкти, збираючи прості геометричні форми, такі як трикутники.

Під час створення файлу STL слід дотримуватися кількох правил. Кожен трикутник у файлі STL має спільні дві вершини з кожним з трикутників (рис. 4). З огляду на це правило правильний файл STL повинен мати парну кількість граней.



Рис. 4. Графічне представлення правила вершин

Правило сортування трикутників рекомендує упорядковувати вершини за зростанням значень координат по осі z для полегшення обробки файлу деякими програмами [1]. Проте, це правило не завжди строго виконується.

Існує два типи кодування файлів у форматі STL: ASCII (рис. 5) і бінарний (рис. 6). Обидва типи містять однакову інформацію, відмінність полягає лише в організації та зберіганні даних у комп'ютері. Формат STL у вигляді ASCII є текстовим кодуванням і може бути переглянутий за допомогою будь-якого текстового редактора. Формат STL у вигляді бінарного коду не може бути прочитаний звичайним текстовим редактором, проте він створює файли меншого розміру.



Рис. 5. Структура файлу у форматі ASCII STL

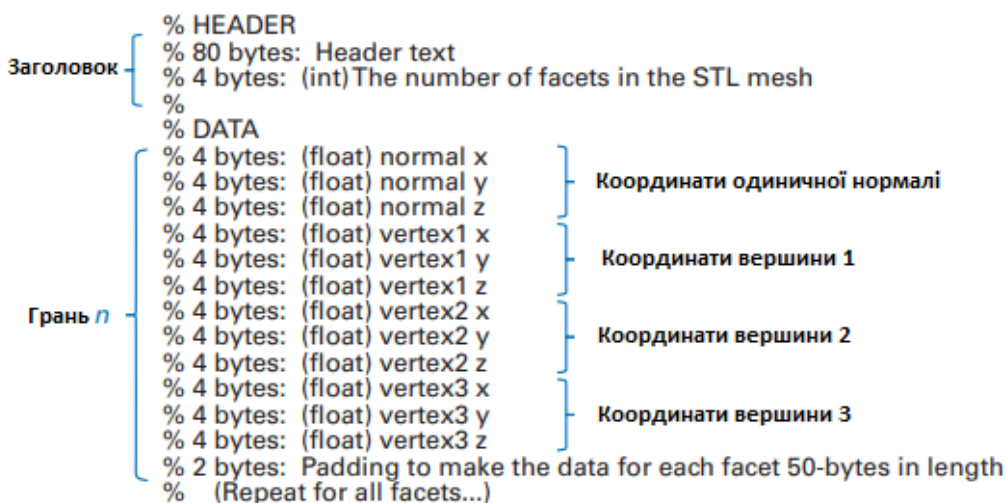


Рис. 6. Структура бінарного файлу STL

Особливість формату STL полягає в тому, що він є безрозмірним. У файлі STL відсутня інформація про масштаб чи довжину. Це означає, що у файлі немає внутрішнього опису одиниць вимірювання, використаних для створення тривимірної моделі. Тому одиниці, що відповідають за розміри, обираються користувачем при відкритті або читанні файлу (наприклад, мікрометри, міліметри, дюйми, сантиметри і т. д.). Після цього можна обчислити площу граней, які утворюють сітку, а також об'єм, включений усередині сітки [5; 6].

Розрахунок площі геометрії у форматі STL досить простий. Формула Герона дозволяє обчислити площу трикутника A_i трикутника i у просторі, знаючи довжини трьох сторін l_k , отже, також напівпериметр p_i . Загальна площа поверхні мережі є сумою всіх площових одиниць A_i кожної грані i .

Довжина ребра l_k між двома точками $A(x_A, y_A, z_A)$ і $B(x_B, y_B, z_B)$ отримується з рівняння:

$$l_k = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}, \quad (1)$$

де $k=1,2,3$.

Півпериметр p_i елементарного трикутника i (грані) задається рівнянням:

$$p_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 l_k. \quad (2)$$

Формула Герона дозволяє визначити площу A_i елементарного трикутника i (грані):

$$A_i = \sqrt{p_i(p_i - l_1)(p_i - l_2)(p_i - l_3)}. \quad (3)$$

Загальна площа сітки:

$$\text{Загальна площа} = \sum A_i. \quad (4)$$

Розрахунок об'єму сітки може бути корисним для оцінки обсягу матеріалу, необхідного для виготовлення виробу. Однак обчислення об'єму, включеного всередині сітки STL, є складною задачею. Найбільш ефективний метод полягає в обчисленні об'єму кожного тетраедра, який має чотири вершини, при цьому основою є елементарний трикутник i (грань, що складається з трьох точок: A, B, C), а вершиною є точка початку координат (O) (рис. 7).

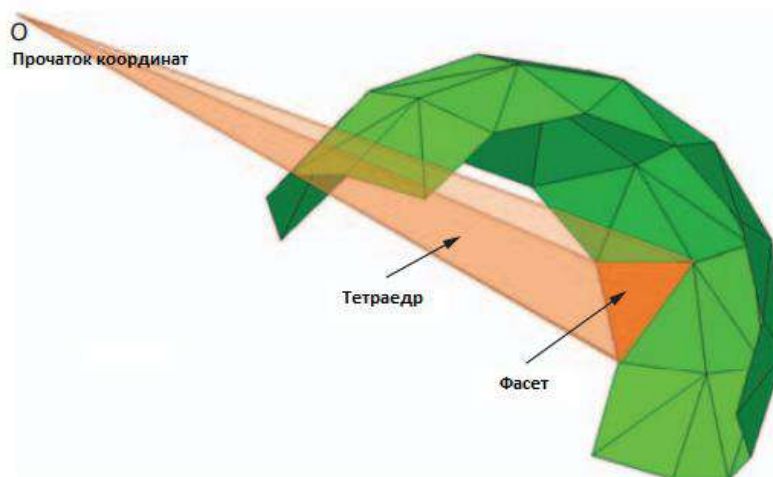


Рис. 7. Графічне представлення створення тетраедра на частині сферичної мережі.

Дискретизація поверхні може стати причиною виникнення дефектів, які, в свою чергу, часто призводять до проблем у подальшому виготовленні деталі. Навіть у відсутності дефектів, якість дискретизованої поверхні може бути оцінена за допомогою геометричних критеріїв якості.

Після автоматичного створення сітки, на жаль, можуть виникати деякі загальні дефекти на отриманій дискретизованій геометрії.

Вектор нормалі до грані повинен вказувати на зовнішню сторону матеріалу, щоб дозволити розрізнити зовнішню та внутрішню частини об'єму. У деяких випадках можливо, що деякі грані отримують нормалі, спрямовані у протилежний бік. Для таких граней вказівка напрямку матеріалу буде невірною. Наприклад, у випадку червоного трикутника (рис. 8) нормаль спрямована всередину, а не на зовнішню сторону. Така грань має обернену нормаль. Можливо, що геометрія, утворена гранями, має пропуски або отвори на поверхні (рис. 9).

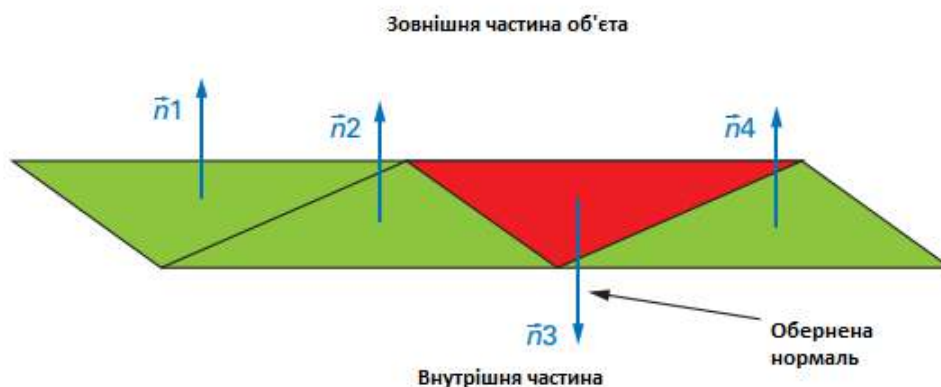


Рис. 8. Нормаль до оберненої грані

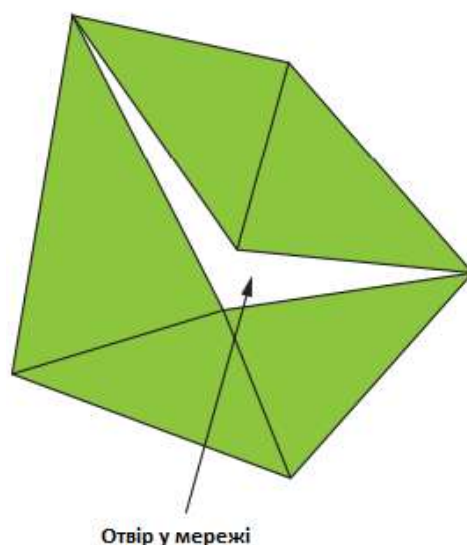


Рис. 9. Незакрита сітка STL

Поверхня, яка була дискретизована, складається з прилеглих граней, де дві сусідні грані мають спільне ребро. Проте є можливість, що одна грань може перекривати іншу замість того, щоб бути прилягаючою до неї (рис. 10). У такому випадку перекриваюча грань не повністю відповідає правилу розміщення вершин.

У певних випадках створення сітки може призвести до появи граней, які перетинаються (рис. 11), що порушує правило розміщення вершин.

У геометрії, яка була дискретизована, можуть існувати окремі грані, які частково або повністю відокремлені від решти геометрії (рис. 12). У такому випадку правило розміщення вершин не дотримується повністю.

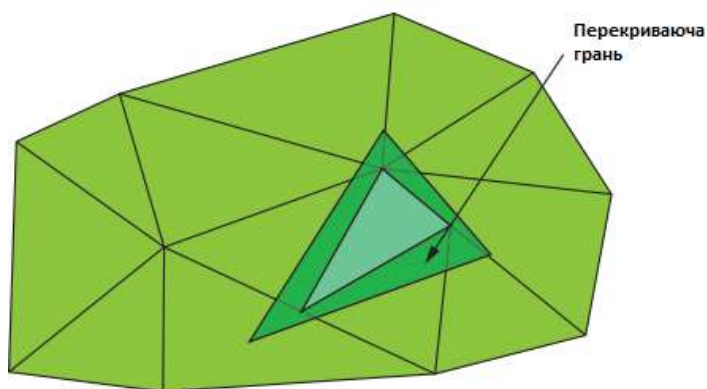


Рис. 10. Випадок перекриваючої грані

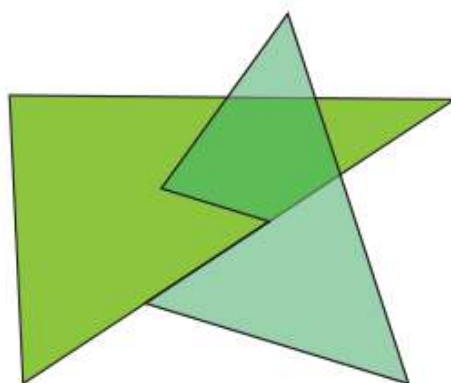


Рис. 11. Випадок з гранями, які перетинаються

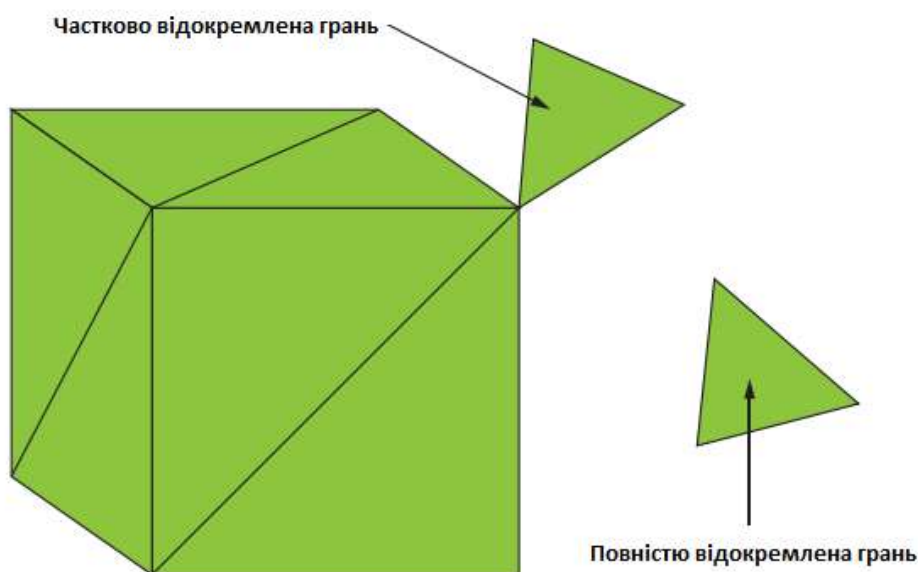


Рис. 12. Випадок з окремими гранями

У програмах комп'ютерно-допоміжного проєктування (САПР) всі ці недоліки зазвичай називаються "неманіфольною геометрією". Щоб виправити ці проблеми максимально ефективно, сучасні програми САПР мають у своєму арсеналі різноманітні інструменти. Наприклад, є інструмент, який дозволяє обертати нормалі граней так, щоб вони коректно вказували на зовнішню сторону матеріалу [7; 8].

Також є інструменти для видалення окремих трикутників або груп трикутників. Ці засоби можуть бути використані для вирішення проблем з перекриттям, перетинами та ізольованими гранями [9; 10].

Також можна вручну створювати додаткові трикутники, наприклад, для заповнення отворів у сітці. Цей ручний підхід підходить для дуже малих отворів. Однак, для великих отворів було розроблено багато автоматичних алгоритмів "заповнення отворів". Серед викликів цих алгоритмів можна відзначити кривизну сусідніх поверхонь та оптимальне відтворення геометрії сусідніх трикутників.

Нарешті, були розроблені інструменти для автоматичного очищення мережі від ізолюваних, дубльованих або граней із некоректною орієнтацією.

Висновки. Дослідження файлів у форматі STL має важливе значення в контексті розвитку адитивного виробництва та цифрових технологій у будівельній галузі. Надання вичерпного опису основної інформації, пов'язаної з використанням цього формату, включає методи обчислення площі та об'єму сітки STL, що є важливим для ефективного моделювання та виробництва деталей.

Під час дослідження виявлено ряд помилок та ключових критеріїв для оцінки геометричної якості сітки. Це включає в себе такі аспекти, як правильне орієнтування нормалей, виявлення та виправлення перекриття, перетинів та ізолюваних граней.

Для подальших досліджень пропонується розглянути альтернативні варіанти подолання деяких недоліків формату STL, таких як автоматизоване виявлення та виправлення помилок у сітці, розробка нових форматів файлів з більшою функціональністю та підтримкою додаткових властивостей моделей. Дослідження таких альтернатив може сприяти поліпшенню ефективності та точності використання файлів для 3D-друку будівельних об'єктів та в адитивному виробництві.

Використання більш продуктивних форматів файлів: замість STL, можна використовувати більш продуктивні формати, такі як OBJ, PLY або 3MF. Ці формати можуть підтримувати більш широкий спектр функцій, таких як текстур, колірні дані, нормалі, та інші.

Використання більш точних форматів: деякі формати, такі як STEP або IGES, забезпечують більш точне представлення геометрії, що може бути корисним для інженерних застосувань та точних обчислень.

Компресія даних: для зменшення обсягу даних та покращення швидкості обробки можна застосовувати методи компресії даних для формату STL або використовувати інші формати з вбудованою підтримкою компресії. Використання додаткових метаданих: додавання додаткових метаданих до файлів, таких як назви, описи, автори тощо, може поліпшити організацію та розуміння моделей.

Стандартизація: встановлення стандартів для створення та обміну файлами тривимірних моделей може поліпшити сумісність та спростити роботу з ними між різними програмами та системами.

Ці альтернативні варіанти можуть допомогти вирішити деякі недоліки формату STL та покращити процес роботи з тривимірними моделями, забезпечуючи кращу якість та продуктивність.

Список використаних джерел

1. 3D printer g-code commands: full list & tutorial. All3DP [Electronic resource]. – Access mode: <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial>.
2. Гусев, В. Дослідження етапів перетворення об'ємної моделі виробу на керуючий код для 3d-принтера в контексті автоматизованого будівництва технології 3d-друку / В. Гусев, Т. Нікіфорова // Український журнал будівництва та архітектури. – 2022. – № 4. – С. 38-45. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.38.876%20>.
3. Nayyeri P. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: a critical review / P. Nayyeri, K. Zareinia, H. Bougherara // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 119, № 5-6. – Pp. 2785-2810.
4. Hager, I. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? / I. Hager, A. Golonka, R. Putanowicz // Procedia engineering. – 2016. – Т. 151. – С. 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>.

5. Гусев, В. Аналіз файлів формату stl як вхідних даних для систем швидкого прототипування / В. Гусев, Т. Нікіфорова // Будівельні конструкції. Теорія і практика. – 2022. – № 11. – С. 77-85. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.77-85>.
6. Khoshnevis, B. Automated construction by contour crafting–related robotics and information technologies / B. Khoshnevis // Automation in construction. – 2004. – Т. 13, № 1. – С. 5-19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012> (дата звернення: 07.07.2022).
7. STL repair (online & offline): the best software of 2021. All3DP. [Electronic resource]. – Access mode: <https://all3dp.com/2/stl-repair-fixer-tool-online-offline>.
8. STL (stereolithography) file format family. Home Library of Congress. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000504.shtml#useful>.
9. Szilvsi-Nagy, M. Analysis of STL files / M. Szilvsi-Nagy, G. Mátyási // Mathematical and computer modelling. – 2003. – Т. 38. – № 7-9. – С. 945-960. [https://doi.org/10.1016/s0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/s0895-7177(03)90079-3).
10. Гусев, В. О. Технологія 3D – друку у будівництві. Концептуальна схема перетворення 3d – моделі виробу в керуючий код для 3D – принтеру / В. О. Гусев, Т. Д. Нікіфорова // Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (cscs-2022) : зб. наук. праць за матеріалами XIV Міжнар. наук.-тех. конф. (м. Полтава, 20-22 лип. 2022 р.). – Полтава : НУ "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", 2022. – С. 59-61.

References

1. 3D printer g-code commands: full list & tutorial. All3DP. <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial/>
2. Husiev, V.O., Nikiforova, T.D. (2022). Doslidzhennia etapiv peretvorennia obiemnoi modeli vyrobu na keruiuchyi kod dlia 3d-ptyntera v konteksti avtomatyzovanoho budivnytstva tekhnolohii 3d-druku [Study of the stages of conversion of a three-dimensional model of a product into a control code for a 3D printer in the context of automated construction of 3d printing technology]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury – Ukrainian Journal of Construction and Architecture*, 4, 38–45. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.38.876%20>.
3. Nayyeri, P., Zareinia, K., Bougherara, H. (2022). Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119, 5-6, 2785–2810.
4. Hager, I., Golonka, A., Putanowicz, R. (2016). 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia engineering*, 151, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
5. Husiev, V. O., Nikiforova, T. D. (2022). Analiz failiv formatu stl yak vkhidnykh danykh dlia system shvydkoho prototypuvannia [Analysis of stl format files as input data for rapid prototyping systems]. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka – Building structures. Theory and practice*, 11, 77–85. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.77-85>.
6. Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting–related robotics and information technologies. *Automation in construction*, 13, 1, 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
7. STL repair (online & offline): the best software of 2021. All3DP. <https://all3dp.com/2/stl-repair-fixer-tool-online-offline/>
8. STL (stereolithography) file format family. Home Library of Congress. <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000504.shtml#useful>
9. Szilvsi-Nagy, M., Mátyási, G. (2003). Analysis of STL files. *Mathematical and computer modelling*, 38, 7-9, 945–960. URL: [https://doi.org/10.1016/s0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/s0895-7177(03)90079-3)
10. Husiev, V.O., Nikiforova, T.D. (2022). Tekhnolohiia 3D – druku u budivnytstvi. Kontseptualna skhema peretvorennia 3d – modeli vyrobu v keruiuchyi kod dlia 3D – prynteru [3D printing technology in construction. Conceptual diagram of the transformation of a 3D product model into a control code for a 3d printer]. *Kompleksni kompozytni konstruksii budivel ta sporud v umovakh voiennoho stanu (cscs-2022): zb. nauk. prats za materialamy XIV Mizhnar. nauk.-tekh. konf. – Complex composite structures of buildings and structures under martial law (CSCS-2022): Collection. of science pr. based on the materials of the XIV International scientific and technical Conf.* (pp. 59–61). National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic".

Отримано 22.03.2024

Vitalii Husiev¹, Tatiana Nikiforova²

¹postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures
Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)
E-mail: husievvitalii@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6813-9824>

²Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.
Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)
E-mail: nikiforova.tetiana@pdaba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0688-2759>

**ANALYSIS OF FILES IN STL FORMAT AS THE BASIS OF MODELING
FOR 3D PRINTING OF BUILDING OBJECTS**

The integration of advanced technologies in the field of software at the stages of construction becomes one of the key tasks of designers. Creating objects using 3D printing requires the use of appropriate high-tech solutions. One of these solutions consists in the analysis of the process of converting three-dimensional models into a control code for 3D printers, in particular, the analysis of files in STL format. The efficiency of manufacturing construction structures and structures by 3D printing depends primarily on this analysis.

This study aims at an in-depth analysis of STL files in light of the growth of additive manufacturing and the advancement of digital technologies in the construction industry.

The purpose of the work is to provide a comprehensive overview of the basic information related to the use of this format, including methods for calculating the area and volume of the STL grid. Identification and analysis of typical errors that may occur when working with files of this format and definition of key criteria for evaluating the geometric quality of the grid. Consideration of strategies and alternative approaches to overcome possible drawbacks that may arise when using the STL format. Creation of a comprehensive view of this format and provision of appropriate recommendations for further improvement of the processes of working with it.

The study of STL files plays an important role in the development of additive manufacturing and digital technologies in the construction industry. This study aims to provide a detailed overview of the basic information related to the use of this format, including methods for calculating the area and volume of an STL mesh, which are crucial for efficient modelling and production of structures. During the research, a number of errors were identified and key criteria for assessing the geometric quality of the grid were determined. This includes correctly orienting normals, detecting and correcting overlaps, intersections, and isolated faces. For further research, it is proposed to consider alternative options for overcoming some of the shortcomings of the STL format. For example, you can consider automated methods of detecting and correcting errors in the network, developing new file formats with greater functionality and support for additional model properties. Investigating such alternatives can help improve the efficiency and accuracy of file use in construction and additive manufacturing.

Keywords: 3D printing; STL files; CAD/CAM; 3D modelling; ASCII format; Layer-by-layer deposition method.

Fig.: 12. **References:** 10.

**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

**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

№ 1(35)

Відповідальний за випуск
Технічний редактор, відповідальна за випуск
Редактор
Комп'ютерна верстка

С. П. Сапон
Н. В. Мороз
О. С. Смелова
О. П. Журко

Підписано до друку 26.03.2024. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 44,2.
Тираж 100 пр. Замовлення № 7/24.

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.