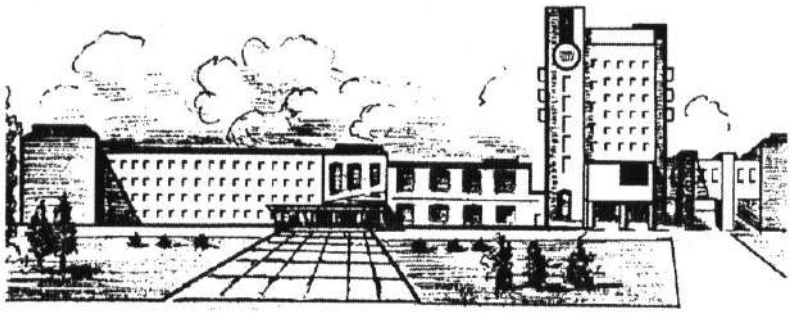
ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 2(28)

Чернігів 2022

УДК 62:67.05
Т38
DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 5 від 30.06.2022 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, відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Т38 **Технічні** науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – № 2(28). – 190 с.

В 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

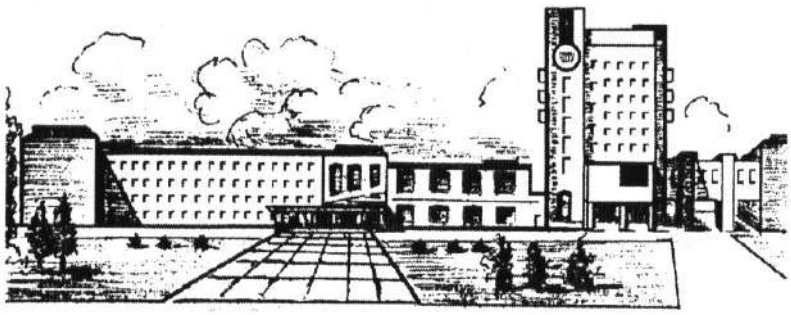
Головний редактор:
Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».
Заступник головного редактора:
Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».
Члени редакційної колегії:
Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування
Бойко С. В., 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.
Повстяной 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 Є. В., доктор технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет;
Павленко П. М., доктор технічних наук, професор, Національний авіаційний університет;
Семенов С. Г., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
Цюцюра С. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури.
Енергетика, електротехніка та електромеханіка
Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);
Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;
Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);
Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
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»;
Дударєв 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.

Заснований у 1996 році. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 24601-14541 ПР від 07.09.2020

© НУ «Чернігівська політехніка», 2022

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 № 2(28)

Chernihiv 2022

UDC 62:67.05
DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 5 dated 30.06.2022). 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, according to which magazine is assigned a category «B».

Technical sciences and technologies : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2022. – № 2(28). – 190 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;
Dmytriiev 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;
Mykhailovskyi D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;
Palianysia B.B., PhD in Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University;
Savenko V.I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;
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.

Founded in 1996. Certificate of State registration
KV № 24601-14541 PR of 07.09.2020

© Chernihiv Polytechnic National University, 2022

ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

Марков О., Хващинський А., Мусорін А., Маркова М., Житніков Р. Розробка нового способу деформування злитків на основі кування профільованих заготовок 7

Кусков Ю., Лебедєв В., Жданов В. Удосконалення електрошлакового наплавлення хромистих чавунів 16

Лисенков Е. Вплив модифікації вуглецевих нанотрубок на мікроструктуру та функціональні властивості полімерних нанокомпозитів на основі поліетилену 22

Жерносєков А., Федорчук В., Новомлинець О. Управління параметрами імпульсів струму при зварюванні плавким електродом алюмінієвих сплавів 31

Петрушинець Л., Новомлинець О., Фальченко Ю., Мельниченко Т., Радченко Л. Дослідження можливості використання проміжних прошарків на основі нікелю при зварюванні ортоалюмініду титану з нікелевим сплавом 38

Бєляєва А., Верба І., Даниленко О. Аналіз конструкції ліфта-підйомника для людей з особливими потребами та його бачення в майбутньому 52

Верба І., Даниленко О., Порхун Н. Як обрати вібраційні опори для верстата? Питання без відповіді 57

Набережна О. УЗК-дослідження впливу вуглецевих волокон на властивості вуглепластиків на основі поліфеніленсульфіду 69

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Панаскін Д., Білоконь Є., Бабко Д. Машинне навчання в діагностиці захворювань легеневої системи 76

РОЗДІЛ ІІІ. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Воробйова В., Васильєв Г., Трус І., Лінючева О. Визначення електрохімічних властивостей природних іонних рідин нового покоління 88

Бакалов В., Кузьменко В., Яриш І. Дослідження залежності напружень зсуву поліетилену від температури і швидкості зсуву 96

Середа О., Мельник О. Новий вид функціональної сировини з підвищеним вмістом білку для бісквітних виробів 102

РОЗДІЛ ІV. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Шинкаренко В., Котлярова В., Монахов Є., Красовський П. Структурні мутації в адаптивній еволюції електромеханічних перетворювачів енергії 111

Войтенко В., Солодчук М. Підвищення швидкості аналізу зображень, отриманих із безпілотного літального апарату 127

Сінчук О., Горшков В. Управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення за допомогою нечіткого регулятора 138

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

Кізєєв М., Куницький М. Визначення температурного режиму стічних вод у каналізаційних мережах за допомогою програми «Tempest» з метою рекуперації теплової енергії 146

Гулько О. Методи дослідження ерозійної деградації ґрунтів у Бродівському районі 162

Ярема Н., Согор А., Согор М., Прохоренко М., Серант О. Вебкартографування розвитку кафедри геодезії Національного університету «Львівська політехніка» 168

Беспалько Р., Гуцул Т., Казімір І., Смага І. Досвід розробки освітньої програми «Геодезія та землеустрій» (спеціалізація «землеустрій та кадастр») у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича 177

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ 189

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE AND MACHINE BUILDING

Markov O., Khvashchynskyi A., Musorin A., Markova M., Zhytnikov R. Development new method of deformation ingots based on forging of profiled workpieces 7

Kuskov U., Lebedev V., Zhdanov V. Improvement of electroslag surface of chrome cast iron 16

Lysenkov E. The effect of carbon nanotubes modification on microstructure and functional properties of polymer nanocomposites based on polyethylene 22

Zhernosekov A., Fedorchuk V., Novomlynets O. Regulation of current pulse parameters during mig welding of aluminum alloys 31

Petrushynets L., Novomlynets O., Falchenko Iu., Melnychenko T., Radchenko L. Study of the possibility of using nickel-based intermediate layers when welding titanium orthoaluminide with a nickel alloy 38

Bieliaieva A., Verba I., Danylenko A. Analysis of the elevator design for people with special needs and its vision in the future 52

Verba I., Danylenko O., Porhun N. How to choose vibration supports for the machine? The question without the answer 57

Naberezhna O. Ultrasound research of the influence of carbon fibers on the properties of carbon plastic based on polyphenylene sulphide 69

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

Panaskin D., Bilokon Ye., Babko D. Machine learning for diagnosis of diseases of pulmonary system 76

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

Vorobyova V., Vasyliev G., Trus I., Linyucheva O. Electrochemical properties of natural ionic liquids of new generation 88

Bakalov V., Kuzmenko V., Igor Ya. Study of the dependence of shear stresses of polyethylene on temperature and shear velocity 96

Sereda O., Melnyk O. A new type of functional raw material with increased protein content for biscuits 102

SECTION IV. ELECTRIC POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

Shynkarenko V., Kotliarova V., Monakhov Ye., Krasovskyi P. Structural mutations in adaptive evolution of electromechanical energy converters 111

Voytenko V., Solodchuk M. Increasing the speed of analysis of images obtained from unmanned aerial vehicle 127

Sinchuk O., Horshkov V. The approach to street electric lighting complex management with the help of a fuzzy regulator 138

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

Kizyeyev M., Kunytskyi M. Determination of temperature regime of wastewater in sewage networks using the “Tempest” program with purpose of heat energy recovery 146

Hulko O. Soil erosion degradation research methods in the brodiv district 162

Yarema N., Sohor A., Sohor M., Prokhorenko M., Serant O. Web-mapping of the development of the department of geodesy of the Lviv Polytechnic National University 168

Bespalko R., Hutsul T., Kazimir I., Smaga I. Having experience in developing the educational program “Geodesy and Land Management” (specialization “Land Management and Cadastre”) at the Yuri Fedkovych National University of Chernivtsi 177

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES 189

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-7-15
УДК 621.923.42

Олег Марков[1], Антон Хващинський[2], Антон Мусорін[3], Марина Маркова[4], Роман Житніков[5]

[1]доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)
E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9377-9866
ResearcherID: L-6561-2018. **Scopus Author ID:** 55648046800

[2]аспірант кафедри обробки металів тиском
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)
E-mail: antonio.hvasherman@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-2690-8354
Scopus Author ID: 57211480253

[3]аспірант кафедри обробки металів тиском
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)
E-mail: anton.m.95@mail.ru. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0571-8700

[4]кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)
E-mail: markova.mar.alex@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7995-3511
Scopus Author ID: 57023421000

[5]аспірант кафедри обробки металів тиском
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)
E-mail: romajitnikov2015@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/ 0000-0002-0540-8465

РОЗРОБКА НОВОГО СПОСОБУ ДЕФОРМУВАННЯ ЗЛИТКІВ НА ОСНОВІ КУВАННЯ ПРОФІЛЬОВАНИХ ЗАГОТОВОК

Останніми роками кількість масивних поковок, виготовлених зі злитків, збільшується. Однак якість таких поковок не завжди відповідає вимогам замовника. Низька якість масивних поковок пояснюється низькою якістю вихідних зливків. Збільшення діаметра конусного уступу (d/D) призводить до зниження ступеня закриття дефекту. Високі конусні уступи збільшують рівень закриття дефектів. Було встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти конусних уступів призводить до зниження опуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. На першому етапі осадження формується подвійна бочка. Випуклість збільшується в разі зниження діаметра конусних торців. При подальшому осадженні подвійна бочка вирівнюється і бічна поверхня на останній стадії осадки набуває форми, близької до циліндричної. Відносні висота та діаметр конусних торців повинні становити 0,4…0,6 та 0,5…0,7 відповідно з погляду закриття осьових дефектів та рівномірного розподілу деформацій при осаджені. Отримані результати осадження у промислових умовах підтвердили встановлені технологічні рекомендації щодо форми та розмірів заготовок, які були отримані теоретичним моделюванням.

Ключові слова: *поковка; осадження; внутрішні дефекти; конусні торці; заварювання пустот; гідростатичні напруження.*
Рис.: 4. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Осьові дефекти зливка усуваються закриттям порожнеч від дії стискаючих напружень при гарячому деформуванні. Для цього необхідно забезпечити у процесі кування відповідний напружений стан. Оцінити ступінь подрібнення структури можна за величиною і градієнтом розподілу деформацій у тілі поковки. Напружений та деформований стан (НДС) у тілі заготовки можна змінювати за допомогою форми заготовки та деформуючого інструменту, а також технологічними режимами деформування [1]. Відома велика кількість способів кування, спрямованих на підвищення якості крупних поковок відповідального призначення. Ці способи засновані на застосуванні нових операцій кування (осадження, протяжка та ін.) та спеціального деформуючого інструменту. Основний інтерес представляє операція осадження великих зливків. Ця операція є основною, що підвищує якість поковки [2]. Зазвичай у виробництві застосовують осадження циліндричних заготовок. Цей спосіб характеризується несприятливими НДС

© Марков О. Є., Хващинський А. С., Мусорін А. В., Маркова М. О., Житніков Р. Ю., 2022

для закриття внутрішніх дефектів та нерівномірним розподілом деформацій. Аналіз літератури показав, що способи осадження великих заготовок відомо дуже багато. Перед використанням нового способу осадження треба проаналізувати дослідження, у яких розглянуто вплив різних способів осадження на закриття внутрішніх дефектів.

Постановка проблеми. У процесі виробництва крупних поковок відповідального призначення важливо гарантувати високу якість поковок. Якість крупних поковок визначається відсутністю внутрішніх дефектів. Ці вимоги викликані тим, що заготовкою є великий ковальський зливок [3]. Великі зливки мають металургійні дефекти (осьові пустоти, усадкова раковина та ін.). Ці дефекти пояснюють занизьку якість зливків. Ковальські зливки мають неоднорідну внутрішню будову, викликану умовами затвердіння рідкої сталі. Відсутність осьових пустот повинно бути гарантовано куванням нагрітих заготовок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При використанні МСЕ моделювався процес закриття внутрішніх порожнин у процесі деформування заготовок циліндричної форми [4]. За результатами моделювання було встановлено, що повне закриття внутрішніх дефектів в осьовій зоні зливка відбувається лише у процесі осадження низьких циліндричних заготовок. Крім того, порожнечі заварюються інтенсивніше в центральній частині зливка. Останнім часом розвиток МСЕ досягає високого рівня та дозволяє досліджувати зміни та формування внутрішньої структури [5].

У дослідженнях [6] представлений метод осадження з обертанням верхнього інструменту, що деформує. Цей метод сприяє зменшенню викривлення форми заготовки після осадження. У роботі [7] досліджено спосіб осадження з обертанням. Процес полягає в лінійному переміщенні інструменту з обертанням осадочних плит у процесі осадження. На думку авторів, цей спосіб приводить до зменшення сили деформування та зменшення неоднорідності деформацій. Це призводить до зменшення випуклості бічної поверхні у процесі осадження.

Автори роботи [8] запропонували оригінальну модель для закриття порожнин, яка враховує їхню геометрію та орієнтацію, а також деформований стан заготовки. Модель була розроблена та перевірена великою кількістю експериментів МСЕ. Однак великі зливки мають внутрішні дефекти, такі як осьова пористість, яка краще моделюється осьовим отвором. Таким чином, отримана в роботі модель не є адекватною для моделювання процесів кування.

У роботі [9] МСЕ вивчили закриття осьових дефектів при осаджені заготовок плоскими плитами різної форми. На основі чисельного аналізу автори встановили, що ступінь деформації надає більшого впливу на закриття порожнин, ніж гідростатичний тиск. Однак отримані результати суперечать відомим даним дослідників [10], які стверджують, що ступінь закриття осьових дефектів залежить від НДС у поковках.

Вплив гідростатичного тиску як параметра для оцінки опрацювання структури розглянуто у роботі [11]. У роботі показано, що ефективною оцінкою закриття осьових дефектів є рівень стискаючих напружень в осьовій зоні. Однак автори не розглядали напружений стан у процесі деформування профільованої заготовки.

У статті [12] автори вивчали механізми закриття внутрішніх дефектів, що мають сферичну форму. Автори досліджували вплив розмірів порожнин на їхнє закриття. Було встановлено, що НДС навколо внутрішніх дефектів є основним фактором, що впливає на закриття порожнеч. Запропоновано модель для прогнозування змін закриття порожнин у великих заготовках у процесі кування. Ця модель була отримана за результатами МСЕ. Основним недоліком цього дослідження є використання дефектів сферичної форми, а осьові дефекти злитків мають подовжену форму. Операцію осадження можна використовувати з додатковими операціями для збільшення укова, але ця операція не сприяє закриттю внутрішніх порожнин, як це було встановлено [13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Перспективним напрямом підвищення ступеня закриття внутрішніх дефектів є профілювання торців циліндричної заготовки перед операцією осадження [14]. Це профілювання дозволить змінити НДС металу заготовки для підвищення рівня стискаючих напружень в осьовій зоні поковки.

Метою статті є визначення ефективної геометрії заготовок із конусними торцями, що забезпечує закриття осьових дефектів у процесі осадження.

Виклад основного матеріалу. Для визначення розмірів осьового дефекту в процесі осадження заготовки з конусними торцями на межі дефекту було розставлено 13 точок від торця заготовки до лінії горизонтальної симетрії. Координати цих точок після моделювання осадження є вихідними значеннями подальших розрахунків середнього об'єму дефекту. Середній діаметр дефекту визначався через середню площу його поперечного перерізу (об'єм дефекту віднесений до його висоти).

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot V_d}{\pi(H_0 - v_t \cdot \mathrm{t})}},$$

де t – час руху деформуючого інструменту, с.;

v_t – швидкість руху інструменту, прийнята 40 мм / с.;

H_0 – початкова висота заготовки, мм;

k – коефіцієнт, що враховує розрахунок половини висоти, k = 2.

Ескізи заготовок для осадження наведено на рис. 1.

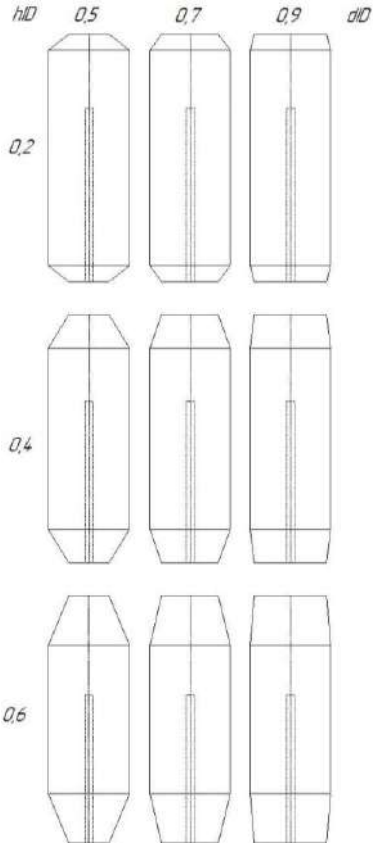


Рис. 1. Ескізи заготовок для осадження

Закриття осьових дефектів. Зміна розмірів та форми осьового дефекту в процесі осадження заготовок із різними відносними діаметрами та висотами конусних уступів представлені на рис. 2. Ці результати дозволяють встановити ступінь закриття осьового дефекту.

З аналізу отриманих результатів осадження заготовок з конусними уступами було зроблено висновок, що повного закриття дефекту заготовки немає. Загальною ознакою досліджуваних схем осадження є інтенсивніше закриття дефектів у зоні між уступом і центральною частинами заготовки. Проте ступінь закриття дефекту всім схем різна. Мінімальне закриття дефекту відбувається при осаджені заготовок з формою близькою до циліндричної (d/D = 0,9). Це пояснюється осадкою майже циліндричної заготовки. В цьому випадку відсутній підпор з боку бічної поверхні заготовки. У результаті відбувається радіальний плин металу зі збільшенням діаметра заготовки та діаметра дефекту.

Закриття дефекту відбувається інтенсивніше при осаджені заготовок із конусними уступами при відносних діаметрах d/D = 0,5…0,7. Відносна висота конусних уступів (h/D) значно впливає на ступінь закриття дефекту. Проте зміна форми осьового дефекту відбувається рівномірно по висоті. Дефект після осадження має складну форму. Тож у дослідженні визначався середній діаметр дефекту. Цей діаметр було віднесено до вихідного діаметра. Аналіз результатів осадження заготовок дозволив встановити, що інтенсивніше закриття дефекту відбувається для високих конусних уступах (h/D = 0,6). Особливо за відносного діаметра уступу d/D = 0,7 (рис. 2). За таких умов дефект закривається приблизно на 35 % ($\frac{d_k}{d_o}$ = 0,65). Найменші висоти конусних уступів призводять до зниження закриття дефекту.

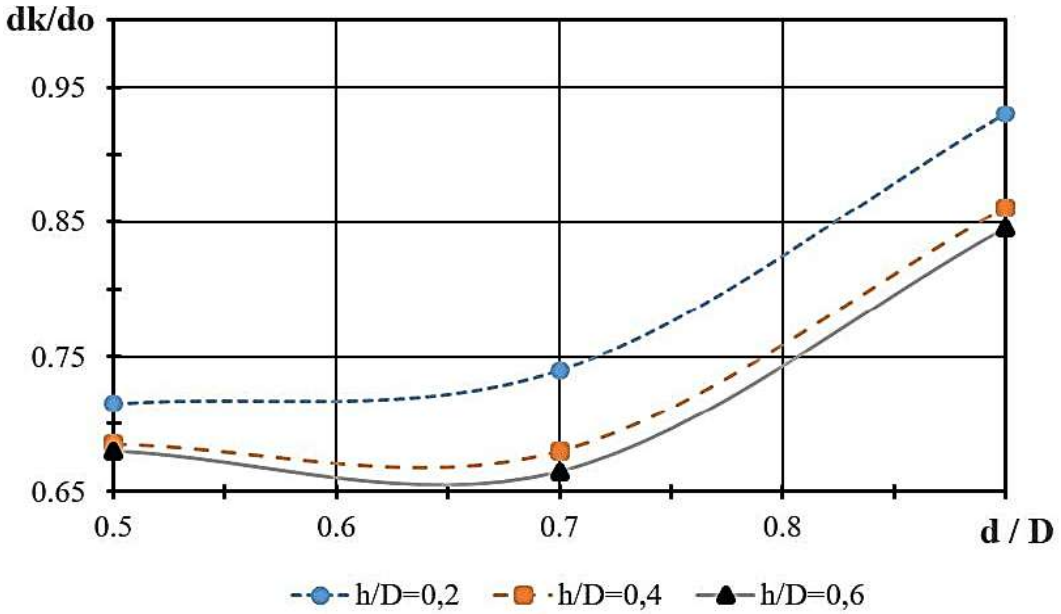


Рис. 2. Зміна відносного діаметра дефекту після осадження на 50 % залежно від відносного діаметра (d/D) та відносної висоти (h/D) конусного уступу

Визначення випуклості поковки після осадження. Перевагою осадження заготовок з конусними уступами є зменшення випуклості бічної поверхні за рахунок формування увігнутої бічної поверхні. Випуклість бічної поверхні є важливим параметром під час виготовлення деталей дисків (шестірні, колеса та ін.). Це пов'язаного з тим, що остаточною операцією їх виготовлення є операція осадження. Випуклість бічної поверхні збільшує об'єм металу заготовки. Цей метал втрачається при механічній обробці. Досліджуваний процес осадження може знизити випуклість та витрати металу. Величину випуклості можна оцінити параметром

$$Q = \frac{V_{\text{заг}} - V_{\text{цил}}}{V_{\text{заг}}} \cdot 100\%,$$

де $V_{\text{заг}}$ – об'єм заготовки до осадження, м^3;

$V_{\text{цил}}$ – об'єм циліндричної частини поковки після осадження, м^3.

Запропонована формула дозволяє врахувати реальний об'єм заготовки для різних розмірів конічних уступів. На основі цієї формули була розрахована випуклість для досліджуваних схем деформування. Розрахований графік зміни випуклості після осадження на 50 % залежно від відносного діаметра (d/D) та відносної висоти (h/D) конусних уступів (рис. 3). Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що в межах 0,5...0,7 відносних діаметрів уступів випуклість мінімальна й не змінюється. Отримані результати корелюють із даними закриття осьових дефектів (рис. 2). Ці дані додатково пояснюють, що закриття осьових дефектів пов'язане з течією металу в радіальному напрямку. Збільшення потоку металу в радіальному напрямку знижуватиме закриття осьових дефектів.

Мінімальна випуклість відповідає конусним уступам із відносною висотою h/D = 0,4. Це пояснюється локалізацією деформацій близько до уступів з утворенням подвійної бочки з глибокою увігнутістю. Діаметр та довжина конусних уступів заготовки впливають на формозміну при осаджені. Було встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти конусних уступів призводить до зниження випуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. У першому етапі осадження формується подвійна бо-

чка. Випуклість збільшується в разі зниження діаметра конусних уступів. При подальшому осадженні подвійна бочка вирівнюється і бічна поверхня на останній стадії осадки набуває форми близької до циліндричної.

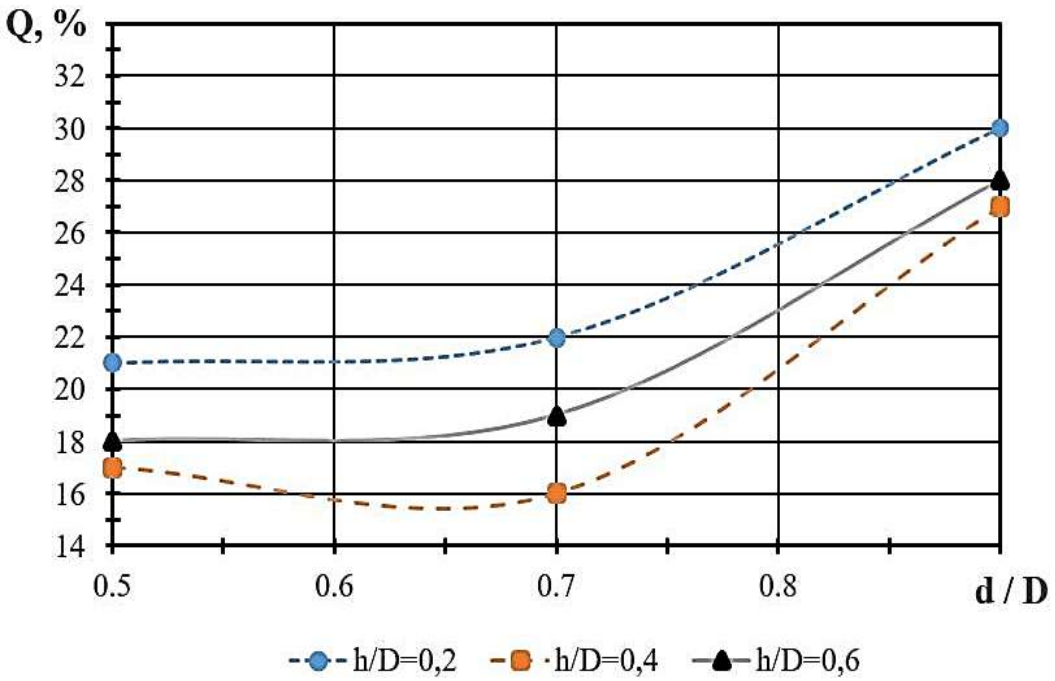


Рис. 3. Опуклість після осадження на 50 % залежно від відносних діаметрів (d/D) та висот (h/D) конусних уступів

Експериментальне дослідження осадження заготовки з конічними уступами. Отримані результати моделювання МСЕ треба перевірити експериментальним дослідженням. Для отримання точніших результатів дослідження процесу кування великих зливків необхідно проводити у промислових умовах. Експеримент на реальних поковках дозволить отримати точніший результат, ніж експеримент на зменшених моделях. У цьому випадку будуть враховані всі фактори, що впливають на процес кування (тепловий стан, коефіцієнт тертя тощо).

На зменшених моделях складно забезпечити реальне температурне поле заготовки у процесі гарячого деформування великих заготовок. Експеримент проводився на злитку масою 66500 кг зі сталі 50Х5Мо. Злиток після нагрівання до температури 1180 °С профілювався для отримання конусних уступів (рис. 4, *а*). На відміну від МСЕ моделювання, заготовка мала циліндричну цапфу з боку правого уступу (рис. 4, *а*). Ця цапфа необхідна для утримання заготовки в процесі кування після осадження. Відносний діаметр і висота конусних уступів становили d/D = 0,6 та h/D = 0,6 відповідно. Ці геометричні параметри були встановлені як оптимальні за результатами теоретичного дослідження з погляду закриття осьових дефектів та рівномірного розподілу деформацій при осаджені. Після профілювання та підігріву зливка осадження проводили плоскими плитами (рис. 4, *б*).

Аналіз отриманих результатів дозволив підтвердити, що після осадження заготовка має мінімальну випуклість (рис. 4, *б*). Це підтверджує зміну НДС у процесі осадження заготовки з конусними уступами. Після кування був проведений ультразвуковий контроль (УЗК), який показав, що у процесі кування сталося зменшення розмірів внутрішніх дефектів. Додатково було встановлено, що відсутність випуклої бічної поверхні («бочки») у процесі осадження унеможливило утворення тріщин (рис. 4, *б*). Осадження таких злитків без конусних уступів із такої ж сталі завжди призводило до утворення тріщин.

а

б

Рис. 4. Формування конусних уступів на злитку (а)
та наступне осадження отриманої заготовки плоскими плитами (б)

За результатами експериментальних досліджень у промислових умовах випуклість зменшилась на 10…15 % у порівнянні з відомим способом осадження. При цьому зменшилась кількість та розміри внутрішніх дефектів на 20…25 % за результатами УЗК.

Висновки. Збільшення діаметра конусного уступу (d/D) призводить до зниження ступеня закриття дефекту. Високі конусні уступи збільшують рівень закриття дефектів. Було встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти конусних уступів призводить до зниження випуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. У першому етапі осадження формується подвійна бочка. Випуклість збільшується в разі зниження діаметра конусних уступів. При подальшому осадженні подвійна бочка

вирівнюється і бічна поверхня на останній стадії осадки набуває форми, близької до циліндричної. Відносні діаметр та висота конусних торців повинна становити d/D = 0,5…0,7 та h/D = 0,4…0,6 відповідно з погляду закриття осьових дефектів та рівномірного розподілу деформацій при осаджені. Отримані результати кування у промислових умовах підтвердили встановлені рекомендації щодо геометрії заготовок МСЕ. За результатами експериментальних досліджень у промислових умовах випуклість зменшилась на 10…15 % у порівнянні з відомим способом осадження. При цьому зменшилась кількість та розміри внутрішніх дефектів на 20…25 % за результатами УЗК.

Список використаних джерел

1. Computerized simulation of shortened ingots with a controlled crystallization for manufacturing of high-quality forgings / Markov O. E., Gerasimenko O. V., Shapoval A. A., Abdulov O. R., Zhytnikov R. U. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 103. – Pp. 3057–3065. – DOI: http://doi.org/10.1007/s00170-019-03749-4.

2. Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet / Smyrnov Y. N., Skliar V. A., Belevitin V. A., Shmyglya R. A., Smyrnov O. Y. // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46(5). – Pp. 325-328. – DOI: http://dx.doi.org/10.3103/S0967091216050132.

3. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton $30Cr_2Ni_4MoV$ forging ingot / Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. // Mater. Design. – 2012. – Vol. 35. – Pp. 446-456. – DOI: http://dx.doi.org/10.1016/ j.matdes.2011.09.056.

4. Zhang X-X. A criterion for void closure in large ingots during hot forging / Zhang X-X., Cui Z-S., Chen W., Li Y. // J Mater Process Tech. – 2009. – Vol. 209(4). Pp. 1950-1959. – DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051.

5. Dobrzański L. A. Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels / Dobrzański L. A., Grajcar A., Borek W. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – Vol. 29 (2). – Pp. 139–142.

6. Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging / Baiqing Z., Haixing L., Yifei T., Dongbo L., Yong X. // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Article ID 531756. – 9 p. – DOI: http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756.

7. Ameli A. A parametric study on residual stresses and forging load in cold radial forging process / Ameli A., Movahhedy M.R. // Int J Adv Manuf Tech. – 2007. – Vol. 33(1–2). – Pp. 7–17. – DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0453-2.

8. Hippenstiel F. Recent developments in gear steels for use in power generation plants / Hippenstiel, F., Johann, K.-P. // Forgemasters Meeting, Santander. – Spain, 3–7 Nov. 2008.

9. Markov O.E. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting [Electronic resource] / Markov O.E., Oleshko M.V., Mishina V.I. // Metalurgical and Mining Industryю – 2011. – Vol. 3(7)ю – Pp. 7–90. – Accessed mode: http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf.

10. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation / Markov O.E., Perig A.V., Markova M.A., Zlygoriev V.N. // Int J Adv Manuf Technol. – 2016. – Vol. 83(9-12). – Pp. 2159–2174. – DOI: http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5.

11. Saby M. A geometry-dependent model for void closure in hot metal forming / Saby M., Bouchard P.-O., Bernacki M. // Finite Elements in Analysis and Design. – 2015. – Vol. 105. – Pp. 63–78. – DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2015.07.003.

12. Markov O.E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces / Markov O.E. // Steel in Translation. – 2012. – Vol. 42(12). – Pp. 808–810. – DOI: https://doi.org/10.3103/S0967091212120054.

13. Development of forging process design to close internal voids / Kakimoto H., Arikawa T., Takahashi Y., Tanaka T., Imaida Y. // J Mater Process Tech. – 2010. – Vol. 210(3). – Pp. 415-422. – DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022.

14. Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot / Kun C., Yitao Y., Guangjie S., Kejia L. // Computational Materials Science. – 2012. – Vol. 51(1). Pp. 72–77. – DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011.

References

1. Markov, O.E., Gerasimenko, O.V., Shapoval, A.A., Abdulov, O.R., & Zhytnikov, R.U. (2019). Computerized simulation of shortened ingots with a controlled crystallization for manufacturing of high-quality forgings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 3057–3065. doi: http://doi.org/10.1007/s00170-019-03749-4.

2. Smyrnov, Y.N., Skliar, V.A., Belevitin, V.A., Shmyglya, R.A., & Smyrnov, O.Y. (2016). Defect healing in the axial zone of continuous-cast billet. *Steel in Translation*, 46(5), 325-328. http://dx.doi.org/10.3103/S0967091216050132.

3. Wang, J., Fu, P., Liu, H., Li, D., Li, Y. (2012). Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton $30Cr_2Ni_4MoV$ forging ingot. *Mater. Design*, 35, 446-456. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056.

4. Zhang, X-X., Cui, Z-S., Chen, W., Li, Y. (2009). A criterion for void closure in large ingots during hot forging. *J Mater Process Tech.*, 209(4), 1950-1959. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051.

5. Dobrzański, L.A., Grajcar, A., Borek, W. (2008). Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 29 (2), 139–142

6. Baiqing, Z., Haixing, L., Yifei, T., Dongbo, L., Yong, X. (2015). Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging. *Mathematical Problems in Engineering*. – Article ID 531756, 9 pages. http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756.

7. Ameli, A., Movahhedy, M.R. (2007). A parametric study on residual stresses and forging load in cold radial forging process. *Int J Adv Manuf Tech.*, 33(1–2), 7–17. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0453-2.

8. Hippenstiel, F., Johann, K.-P. (2008). Recent developments in gear steels for use in power generation plants. *Forgemasters Meeting*, Santander, Spain, (3–7 Nov. 2008).

9. Markov, O.E., Oleshko, M.V., Mishina, V.I. (2011). Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting. *Metalurgical and Mining Industry*, 3(7), 87–90. http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/ 87Markov.pdf.

10. Markov, O.E., Perig, A.V., Markova, M.A., Zlygoriev, V.N. (2016). Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *Int J Adv Manuf Technol.*, 83(9-12), 2159–2174. http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5.

11. Saby, M., Bouchard, P.-O., Bernacki, M. (2015). A geometry-dependent model for void closure in hot metal forming. *Finite Elements in Analysis and Design*, 105, P. 63–78. http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2015.07.003.

12. Markov, O.E. (2012). Forging of Large Pieces by Tapered Faces. *Steel in Translation*, 42 (12), 808 – 810. https://doi.org/10.3103/S0967091212120054.

13. Kakimoto, H., Arikawa, T., Takahashi, Y., Tanaka, T., Imaida, Y. (2010). Development of forging process design to close internal voids. *J Mater Process Tech.*, 210(3), 415–422. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022.

14. Kun, C., Yitao, Y., Guangjie, S., Kejia, L. (2012). Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot. *Computational Materials Science*, *51*(1), 72–77. http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011.

Отримано 21.05.2022

UDC 621.923.42

Oleg Markov[1], Anton Khvashchynskyi[2], Anton Musorin[3], Marina Markova[4], Roman Zhytnikov[5]

[1]Doctor of Technical Science, Professor of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)
E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9377-9866
ResearcherID: L-6561-2018. **Scopus Author ID:** 55648046800

[2]postgraduate of the Metal Forming Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)
E-mail: antonio.hvasherman@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-2690-8354
Scopus Author ID: 57211480253

[3]postgraduate of the Metal Forming Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)
E-mail: anton.m.95@mail.ru. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0571-8700

[4]PhD of Technical Science, docent of the Metal Forming Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)
E-mail: markova.mar.alex@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7995-3511
Scopus Author ID: 57023421000

[5]postgraduate of the Metal Forming Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)
E-mail: romajitnikov2015@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/ 0000-0002-0540-8465

DEVELOPMENT NEW METHOD OF DEFORMATION INGOTS BASED ON FORGING OF PROFILED WORKPIECES

Quantity of massive parts produced from an ingot is increasing today. It is caused by increasing of a massive equipment powerful. However, the quality of produced forging parts does not corresponds to customer`s requirements. Poor quality of the produced forging parts is caused by low quality of forging ingots.

Defects of ultrasonic test after forging of the massive forging parts equal to 10 %. The defects after ultrasonic test are caused by upsetting operation of the ingots with no equal internal structure. As a result, internal structure is processed unevenly and insufficiently. Increasing of the ingot internal defects occurs during upsetting operation of billets by flat deformation tools.

The purpose of this work is establishing the rational geometry of billets with conical faces which guarantee the welding of the axial defects during upsetting operation.

Rising diameter of conical face provide decreasing of defect welding degree. The toll conical faces rise the degree of the welding defects. It was established that decreasing of the diameter and rising of the height the conical faces provide to reduction of convexity of the workpiece. In the initial step of the upsetting operation the "double convexity" is occurred. The convexity is growing at the diameter decrease of the conical faces. The "double convexity" levels out and the external surface of the workpiece obtains the nearly cylindrical shape in the finish upsetting. The relative height and diameter of the conical faces have to be 0.4…0.6 and 0.5…0.7 respectively concerning the welding defects and equable distribution of the deformations at the upsetting. Obtained data of the upsetting in the manufactured conditions verified the established technological recommendations of the workpiece shape and dimensions obtained by theoretical modeling.

Keywords: *forged part; upsetting; internal defects; conical faces; cavity welding; hydrostatic stresses.*

Fig.: 4. References: 14.

Марков О., Хващинський А., Мусорін А., Маркова М., Житніков Р. Розробка нового способу деформування злитків на основі кування профільованих заготовок. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 7-15.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-16-21
УДК 621.781.92

Юрій Кусков[1], Володимир Лебедєв[2], Володимир Жданов[3]

[1]доктор технічних наук, провідний науковий співробітник
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)
E-mail: kuskov.yuriy@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8091-2274

[2]доктор технічних наук, головний конструктор
Державне підприємство «Дослідне конструкторсько-технологічне бюро
Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України» (Київ, Україна)
E-mail: valpaton@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0391-6113

[3]молодший науковий співробітник
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (м. Київ, Україна)
E-mail: vovik1982@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7988-2752

УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ

Показано, що електрошлакове наплавлення хромистих чавунів дозволяє значно покращити їхні механічні властивості й отримувати бездефектний якісний наплавлений метал і виріб загалом. Запропоновані нові технічні рішення щодо обладнання зі струмопідвідним кристалізатором. Така техніка та технологія є досить перспективною і ефективною. Вона може бути запропонована для більш широкого впровадження в певних галузях виробництва завдяки порівняно простій реалізації способу наплавлення хромистих чавунів, який дозволяє в досить широкому діапазоні регулювати структуру та експлуатаційні властивості наплавленого чавуну.

Ключові слова: *електрошлакове наплавлення; хромисті чавуни; струмопідвідний кристалізатор.*
Рис.: 2. Табл.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження Білі чавуни, леговані хромом, мають високу опірність зношування [1-3]. Умовно їх можна поділити на три типи: низько- середньо- і високохромисті, що відрізняються не тільки вмістом хрому, а і структурою, що формується при їх кристалізації. При вмісті хрому в кількості менше ніж 12 % у структурі утворюється карбід цементитного типу (Fe,Cr)3Cc мікротвердістю HV 8000-10 000 МПа та ледебурит [2]. Найбільше відомих марок хромистих чавунів містить 12-20 % Cr з мікротвердістю спеціальних карбідів хрому (Cr,Fe)7C3 - HV 13700-24400 МПа і хромисто-карбідну евтектику [2]. При вмісті хрому в чавуні 20 % і більше у структурі з'являється евтектика на основі карбіду Cr23C6, який поступається твердістю карбіду Cr7C3 (HV 12250-22800 МПа) [2; 4].

У білих зносостійких чавунах ледебурит із погляду правила Шарпі [4] має несприятливу морфологію його структурних складових. Соти евтектичного аустеніту (перліту) ізольовані один від одного твердою та тендітною цементитною матрицею і не надають практично позитивного впливу на загальну пластичність матеріалу. Легування Fe-Cr-C сплавів досить високою кількістю хрому змінює характер кристалізації з утворенням більш пластичної хромисто-карбідної евтектики (Cr,Fe)7C3-γ.

Таким чином, хромисті чавуни з підвищеним вмістом хрому (≥ 12 % Cr) мають структуру не тільки з високотвердими карбідами, але й відносно пластичною евтектикою. Таке поєднання властивостей дозволяє широко їх використовувати не тільки в умовах суто абразивного зношування, але й у тих випадках, коли експлуатація додатково супроводжується ударними навантаженнями.

Постановка проблеми. Незважаючи на таке поєднання позитивних властивостей хромисті чавуни мають обмеження щодо їх застосування при електродуговому наплавленню. Це пов'язано з особливостями термічного циклу цього способу та практично неможливістю наплавлення навіть щодо невеликих шарів (менше як 10-12 мм) без утворення в металі тріщин. Існує потреба у вирішенні цієї проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оптимальним способом нанесення на зношуються поверхні шарів з хромистих чавунів є електрошлакове наплавлення (ЕШН). Більш «м'який» термічний цикл порівняно з дуговим наплавленням відносно рівномірні

© Кусков Ю. М., Лебедєв В. О., Жданов В. О., 2022

теплові умови при кристалізації наплавленого металу дозволяє забезпечувати при наплавленні отримання бездефектного наплавленого металу навіть при товщинах, що становлять десятки сантиметрів, що зазначено у вищезгаданих роботах [1-3; 5; 6].

У таблиці представлені результати порівняльного дослідження механічних характеристик наплавленого та литого чавуну. Як видно з таблиці, механічні властивості наплавленого хромистого чавуну значно зростають у порівнянні з чавуном аналогічного хімічного складу.

Таблиця – Механічні властивості та твердість наплавленого та литого хромистого чавуну (~3 %С, 16 %)

Вид чавуну	**Механічні властивості**				**Твердість HRC**
	$\sigma_в$, МПа	KCU, МДж/м^2	$\sigma_{зг}$, МПа	Стріла прогину, мм	
Наплавлений	600	0,13	1270	2,3	~ 50
Літій	420	-	280	1,7	~ 50

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Без належної уваги зостаються питання, які пов'язані з подальшими напрямками вдосконалення техніки та технології електрошлакового наплавлення хромистих чавунів з метою підвищення їх експлуатаційних якостей. Важливими елементами цього процесу є пошук найбільш сучасних систем кристалізаторів, в тому числі і струмопідвідних конструкцій, які можуть бути застосовані на відповідних виробництвах зі значною ефективністю, яка зумовлюється отриманням наплавленого чавуну при оптимальних витратах. До цього часу нема аналізу роботи нових конструкцій кристалізаторів і технологій на основі їх використання.

Метою статті є визначення та аналіз напрямку суттєвого поліпшення характеристик наплавлення хромистих чавунів для забезпечення міцності отриманого шару без розтріскування з обґрунтованим вибором типу кристалізатора для ефективного здійснення процесу наплавлення.

Виклад основного матеріалу. Найбільш прогресивним способом ЕШН є спосіб наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі (ТПК) [7]. Основна його перевага – це виключення жорсткого зв'язку між наплавним матеріалом, що подається у шлакову ванну, і електричними параметрами процесу наплавлення.

Конструктивна відмінність ТПК від звичайних кристалізаторів, що застосовуються при електрошлакових переплавах і наплавленні, полягає в тому, що він є секційним пристроєм, усі секції якого розташовані один над одним і роз'єднані між собою електроізоляційними прокладками. Зазвичай таких секцій три: струмопідвідна, проміжна і формуюча, але іноді використовують і дві секції (рис. 1 і 2). Саме завдяки підведенню напруги від джерела живлення до верхньої струмопідвідної секції, такий кристалізатор дозволяє використовувати його при наплавленні горизонтальних і вертикальних поверхонь не тільки наплавні матеріали, що зазвичай застосовуються (дроти, стрічки, електроди великого перерізу), але і дискретні й навіть рідкі присадки різного хімічного складу, у тому числі і хромистого чавуну. У конструкцію також закладена здатність забезпечувати при наплавленні обертання шлакової та металевої ванн.

Особливо перспективно використовувати дискретні присадки. Частинки присадки, розплавляючись у шлаковій ванні й очищаючись у ній від шкідливих домішок, надходять в оплавленому чи розплавленому вигляді в металеву ванну, яка потім кристалізується в наплавлений метал. При правильному виборі розмірів частинок і масової швидкості їх подачі в шлакову ванну можна забезпечити формування в рідкому металі, що кристалізується, великої кількості центрів кристалізації. Ці центри дозволяють модифікувати наплавлений метал, унаслідок чого структура виходить рівномірною та дрібнозернистою. Така змінена структура сприяє підвищенню механічних та спеціальних (зносостійкість, стійкість проти термічної втоми) властивостей металу.

Ці уявлення про процеси, що протікають при кристалізації рідкого наплавленого металу, були підтверджені при ЕШН дискретною присадкою (дробом) з хромистого чавуну різного фрикційного складу [8]. Крім того, було встановлено, що обертання шлакової ванни навіть із порівняно невеликими кутовими швидкостями також впливає на покращення дисперсності структури наплавленого чавуну.

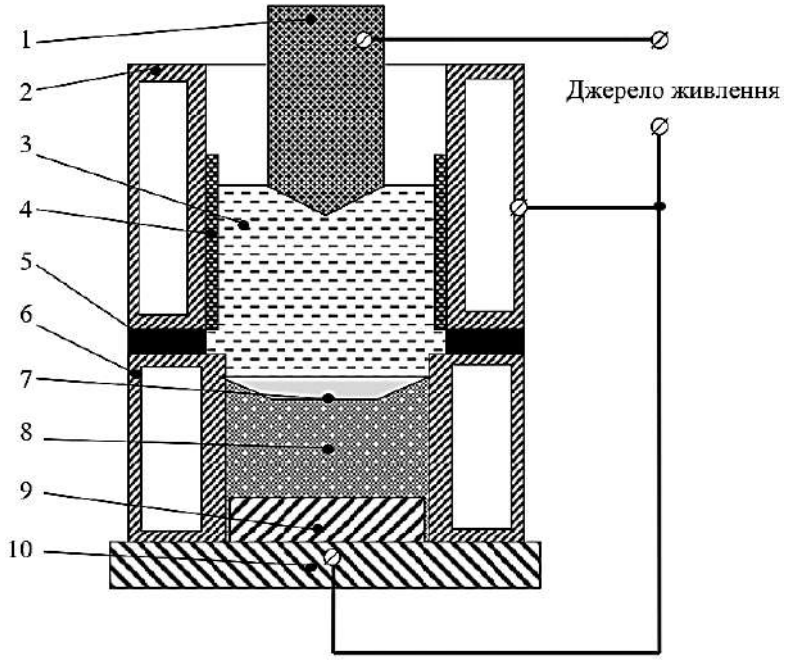


Рис. 1. Схема електрошлакового наплавлення у двосекційному струмопідвідному кристалізаторі з використанням електрода великого перерізу:
1 електрод; 2, 6 – струмопідвідна і формуюча секції; 3 – шлакова ванна;
4 – захисна футеровка; 5 – електроізоляційна прокладка; 7 – металева ванна;
8 – наплавлений метал; 9 – наплавлюваний виріб; 10 – піддон

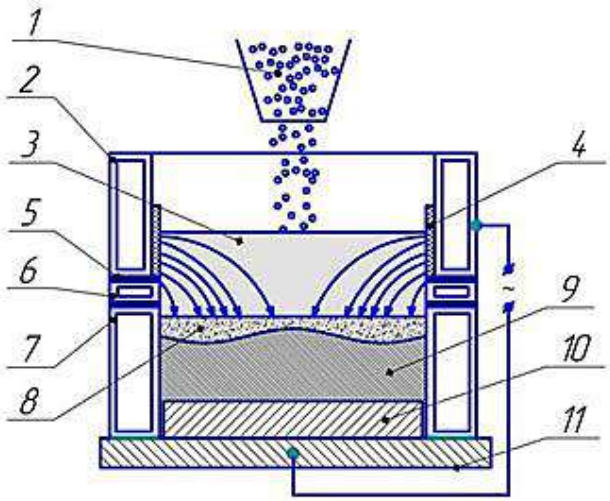


Рис. 2. Схема електрошлакового наплавлення у трисекційному струмопідвідному кристалізаторі з використанням дискретної наплавної присадки:*
1 – дискретна присадка; 2, 6, 7 – струмопідвідна, проміжна і формуюча секції;
3 – шлакова ванна; 4 – захисна футеровка; 5 – електроізоляційна прокладка;
8 – металева ванна; 9 – наплавлений метал; 10 – наплавлюваний виріб; 11 – піддон
** – стрілки показують розподіл струму у шлаковій ванні.*

Найбільший досвід ЕШН дробом хромистого чавуну та експлуатації наплавлених виробів отримано при відновленні робочих поверхонь бочок сталевих і чавунних валків прокатних станів різного призначення [9; 10 та ін.].

Товщина наплавленого шару становила 25-50 мм. Стійкість сталевих валків стану 300, наплавлених дробом хромистого чавуну (16 ... 20 % Cr), в 1,5-2,0 раза вище за стійкість литих валків із хромистого чавуну.

Відновлення наплавленням дробом хромистого чавуну (до 25 % Cr) прокатні чавунні валки діаметром до 520 мм штрипсових і дрібносортних станів показали стійкість литих двошарових валків, які зазвичай встановлюються в цих станах [9].

Подача дробу в шлакову ванну при ЕШН валків такого типу здійснюється за допомогою пристрою ОБ-1960 (конструкція ІЕЗ ім. Є. О. Патона), що являє собою шестерню, концентрично розташовану щодо наплавлюваної поверхні бочки валка, по якій зворотно-обертально переміщається дозатор-живильник з бункером для дробу ємністю ~20 кг. Під час наплавлення бункер постійно поповнюється наплавним матеріалом.

Для наплавлення валків більшого діаметра і довжини бочки (до 2 м і більше) використовується електромагнітні дозатори з бункерами, обсяг яких забезпечує необхідну кількість дробу, що вводиться у шлакову ванну.

Промислове застосування при наплавленні прокатних валків також знайшов спосіб ЕШН в ТПК з використанням як присадка рідкого металу (швидкорізальної сталі та хромистого чавуну) [11]. Подачу рідкої присадки, отриманої в дуговій печі, здійснюється за допомогою міксерів-дозаторів [12]. Наплавлений шар із хромистого чавуну, що містить 2,6...3,6 % С і 20...22 % легуючих елементів, дозволяє забезпечити сумарний і питомий рівень напрацювання робочої поверхні бочки у 2,0...2,2 раза вищий, ніж у традиційних хромонікелевих валків для комплектування відповідних станів [13].

Новим напрямом розвитку ЕШН в ТПК є наплавлення шару хромистого чавуну на горизонтально розташовані поверхні деталей. Така технологія дозволяє, наприклад, отримувати біметалічні армуючі елементи для зміцнення швидкозношуваних робочих поверхонь обладнання гірничо-металургійного комплексу [14]. Присадним матеріалом може бути дріб або електроди великого перерізу. Другий тип наплавочних матеріалів можна застосовувати в разі наплавлення відносно великих (діаметром більше за 200 мм) поверхонь для досягнення оптимального нагрівання центральної частини заготівлі та якісного з'єднання основи та наплавленого шару по всій поверхні, що з'єднується. Їх застосування може також визначатися оцінкою техніко-економічної доцільності використання при наплавленні того чи іншого типу наплавного матеріалу.

Висновки.

1. Хромисті чавуни з підвищеним вмістом хрому є оптимальним наплавним матеріалом для електрошлакового наплавлення шарів поверхонь обладнання, що опираються як абразивному, так і ударно-абразивному зношуванню.

2. Найбільш перспективним способом ЕШН хромистого чавуну є наплавлення в ТПК, що дозволяє в широких межах регулювати структуру та експлуатаційні властивості наплавленого чавуну.

3. Великий практичний досвід, отриманий при ЕШН у ТПК валків прокатних станів, дозволив розробити нові технологічні рішення, зокрема, отримання плоских біметалічних армуючих елементів.

Список використаних джерел

1. Гарбер М. Е. Отливки из белых износостойких чугунов / М. Е. Гарбер. – М. : Машиностроение. 1972. – 112 с.

2. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цыпин. – М. : Металлургия 1983. – 176 с.

3. Липницкий А. М. Плавка чугуна и сплавов цветных металлов / А. М. Липницкий. – М. : Машиностроение. 1973. – 192 с.

4. Жуков А. А. Износостойкие отливки из комплексно-легированных белых чугунов / А. А. Жуков, Г. И. Сильман, М. С. Фрольцов. – М. : Машиностроение. 1984. – 104 с.

5. Метлицкий В. А. Дуговая наплавка слоя износостойкого высокохромистого чугуна / В. А. Метлицкий, В. В. Осин // Сварочное производство. – 2008. – № 4. – С. 25-30.

6. Рябцев И. А. Износостойкий и коррозионностойкий биметалл / И. А. Рябцев, Ю. В. Демченко, А. И. Панфилов. – К. : ИЭС им. Е.О Патона НАН Украины, 2020. – 224 с.

7. Кусков Ю. М. Наплавка в токоподводящем кристаллизаторе – перспективное направление развития электрошлаковой технологии / Ю. М. Кусков // Автоматическая сварка. – 1999. – № 9. – С. 76-80.

8. Кусков Ю. М. Влияние размера наплавочной дроби и технологических параметров электрошлаковой наплавки на структурообразование наплавленного высокохромистого чугуна / Ю. М. Кусков, И. Л. Богайчук, М. А. Фесенко // Электрометаллургия. – 2021. – № 7. – С. 12-18.

9. Электрошлаковые технологии наплавки и рециклинга металлических и металлосодержащих отходов / Ю. М. Кусков, И. А. Рябцев, О. Г. Кузьменко, И. П. Лентюгов. – К. : Интерсервис, 2020. – 288 с.

10.Кусков Ю.М., Сарычев И.С. Восстановительная электрошлаковая наплавка чугунных валков стана 2000 / Ю. М. Кусков // Сварочное производство. – 2004. – № 2. – С. 39-43.

11.Создание комплекса ЭШН жидким присадочным металлом рабочих валков горячей прокатки для непрерывных широкополосных станов / В. Б. Шабанов, О. В. Свиридов, Ю. Н. Белобров и др. // Автоматическая сварка. – 1999. – № 9. – С. 51-54.

12.Современное литейные технологии и оборудование для внепечной обработки и разливки сплавов цветных и черных металлов с применением МГД – техники / В. И. Дубоделов, В. Н. Фикссен, В. К. Погорский, М. С. Горюк // Процессы литья. – 2007. – № 1-2. – С. 54-61.

13.Ковалев Ю. М. Разработка и исследование высокохромистой стали для рабочего слоя композитных валков, производимых в условиях ЗАО НКМЗ / Ю. М. Ковалев, А. С. Волков, В. Е. Фельдман // Технология металлов. – 2005. – № 3. – С. 46-47.

14.Получение электрошлаковой наплавкой биметаллических армирующих элементов для упрочнения изделий горно-металлургического комплекса / Ю. М. Кусков, В. А. Жданов, В. Н. Проскудин, А. В. Нетяга // Сталь. – 2021. – № 4. – С. 15-17.

References

1. Garber, M.E. (1972). *Otlivki iz belykh iznosostoikikh chugunov [Castings from white wear-resistant cast irons]*. Mashinostroenie.

2. Cypin, I.I. (1983). *Belye iznosostoikie chuguny. Struktura i svojstva [White wear-resistant cast irons. Structure and properties. Structure and properties]*. Metallurgiia.

3. Lipnickii, A.M. (1973). *Plavka chuguna i splavov cvetnyh metallov [Smelting of cast iron and non-ferrous metal alloys]*. Mashinostroenie.

4. Zhukov, A.A., Silman, G.I., & Frolcov, M.S. (1984). *Iznosostoikie otlivki iz kompleksnolegirovannykh belykh chugunov [Wear-resistant castings from complex-alloyed white cast irons]*. Mashinostroenie.

5. Metlickii, V.A., & Osin, V.V. (2008). Dugovaia naplavka sloia iznosostoikogo vysokokhromistogo chuguna [Arc surfacing of a layer of wear-resistant high-chromium cast iron]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, (4), 25-30.

6. Ryabcev, I.A., Demchenko, Yu.V., & Panfilov, A.I. (2020). *Iznosostoikii i korrozionnostoikii bimetall [Wear-resistant and corrosion-resistant bimetal]*. IES im. E.O Patona NAN Ukrainy.

7. Kuskov, Yu.M. (1999). Naplavka v tokopodvodyashem kristallizatore – perspektivnoe napravlenie razvitiya elektroshlakovoj tehnologii [Surfacing in a current-carrying mold is a promising direction in the development of electroslag technology]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, (9), 76-80.

8. Kuskov, Yu.M., Bogajchuk, I.L., & Fesenko, M.A. (2021). Vliyanie razmera naplavochnoj drobi i tehnologicheskih parametrov elektroshlakovoj naplavki na strukturoobrazovanie naplavlennogo vysokohromistogo chuguna [Influence of the size of surfacing shot and technological parameters of electroslag surfacing on the structure formation of deposited high-chromium cast iron]. *Elektrometallurgiia – Electrometallurgy*, (7), 12-18.

9. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., & Lentyugov, I.P. (2020). *Elektroshlakovye tehnologii naplavki i reciklinga metallicheskih i metalloso-derzhashih othodov [Electroslag technologies for surfacing and recycling of metal and metal-containing waste]*. Interservis.

10. Kuskov, Yu.M., & Sarychev, I.S. (2004). Vosstanovitelnaya elektroshlakovaya naplavka chugun-nyh valkov stana 2000 [Restorative electroslag surfacing of cast-iron rolls of the mill 2000]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production,* (2), 39-43.

11.Shabanov, V.B., Sviridov, O.V., Belobrov, Yu.N. (1999). Sozdanie kompleksa EShN zhidkim prisadochnym metallom rabochih valkov goriachei prokatki dlia nepreryvnykh shirokopolosnykh stanov [Creation of an ESP complex with liquid filler metal of hot rolling work rolls for continuous broadband mills]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding,* (9), 51-54.

12.Dubodelov, V.I., Fikssen, V.N., Pogorskii, V.K., & Goryuk, M.S. (2007). Sovremennoe liteinye tehnologii i oborudovanie dlia vnepechnoi obrabotki i razlivki splavov cvetnyh i chernykh metallov s primeneniem MGD – tehniki [Modern foundry technologies and equipment for out-of-furnace treatment and pouring of non-ferrous and ferrous alloys using MHD technology]. *Processy litia – Casting processes*, (1-2), 54-61.

13.Kovalev, Yu.M., Volkov, A.S., & Feldman, V.E. (2005). Razrabotka i issledovanie vysokohromi-stoj stali dlya rabochego sloya kompozitnyh valkov, proizvodimyh v usloviyah ZAO NKMZ [Development and research of high-chromium steel for the working layer of composite rolls produced in the conditions of ZAO NKMZ]. *Tehnologiya metallov – Technology of metals,* (3), 46-47.

14.Kuskov, Yu.M., Zhdanov, V.A., Proskudin, V.N., Netiaga, A.V. (2021). Poluchenie elektroshlakovoj naplavkoj bimetallicheskih armiruyushih elementov dlya uprochneniya izdelij gorno-metallurgicheskogo kompleksa [Obtaining by electroslag welding of bimetallic reinforcing elements for hardening of products of the mining and metallurgical complex]. *Stal – Steel*, (4), 15-17.

Отримано 01.06.2022

UDC 621.781.92

Yuriy Kuskov[1], Volodymyr Lebedev,[2] Volodymyr Zhdanov[3]

[1]Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher
E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: kuskov.yuriy@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8091-2274

[2]Doctor of Technical Sciences, Chief designer
SF "Experimental Design-Technological Office of the E. O. Paton Electric Welding
Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: valpaton@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0391-6113

[3]Junior researcher, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vovik1982@ukr.net **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7988-2752

IMPROVEMENT OF ELECTROSLAG SURFACE OF CHROME CAST IRON

The main disadvantages of the existing methods of improving the strength of coatings, including the use of electroslag surfacing, on existing equipment structures to implement this process are considered. The task is to significantly improve the process of electroslag surfacing to ensure the desired operational strength of the coating and thus ensure the absence of cracks in the metal.

It is shown that electroslag surfacing of chromium cast irons allows to significantly improve their mechanical properties, in particular strength and to obtain defect-free high-quality welded metal for operational requirements. The use of current-carrying crystallizer expands the possibilities of use in the surfacing of different types of surfacing materials and regulating the structure and properties of the weld metal. The industrial experience of electroslag surfacing in the current-carrying crystallizer of rolled rolls with the use of chromium cast iron in the form of fractions and liquid additives, including chromium cast iron, is presented. A new direction in the development of surfacing works is shown - obtaining flat bimetallic blanks designed to strengthen fast-wearing surfaces.

It is emphasized that a significant advantage of the current-carrying mold is its sectional design.

Various schemes of realization of electroshack surfacing process both two-section and three-section with their features and definition with definition of the basic advantages and lacks are presented.

This technology is quite promising and effective and can be proposed for wider implementation, due to the fact that there are relatively simple ways to implement surfacing.

Key words: *electroslag surfacing, chromium cast irons, current supply crystallizer.*

Fig.: 2. Table: 1. References: 14.

Кусков Ю., Лебедєв В., Жданов В. Удосконалення електрошлакового наплавлення хромистих чавунів. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 16-21.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-22-30
УДК 538.9

Едуард Лисенков

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем
Чорноморський національний університет імені Петра Могили (Миколаїв)
E-mail: ealysenkov@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-1369-4609
ResearcherID: R-2601-2019. **SCOPUS Author ID:** 39761976100

ВПЛИВ МОДИФІКАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК НА МІКРОСТРУКТУРУ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІЕТИЛЕНУ

У науковій статті наведено результати досліджень мікроструктури та функціональних характеристик полімерних нанокомпозитних матеріалів на основі поліетилену шляхом введення до їхнього складу модифікованих вуглецевих нанотрубок. З метою поліпшення властивостей матеріалів проводили модифікацію нанотрубок за допомогою поліетиленгліколю. Методами оптичної мікроскопії, імпедансної спектроскопії та механічних випробувань було досліджено мікроструктуру, електричні та механічні характеристики полімерних нанокомпозитних матеріалів. Показано, що нековалентна функціоналізація ВНТ за допомогою обробки поліетиленгліколем приводить до кращого розподілу нанотрубок у полімерній матриці та поліпшення електричних і механічних властивостей нанокомпозитних матеріалів на основі поліетилену.

Ключові слова: *вуглецеві нанотрубки; полімерний нанокомпозит; електропровідність; механічна міцність.*
Рис.: 5. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Полімерні нанокомпозити – це багатофазні матеріали, які складаються з полімеру або кополімеру, що містить наночастинки або нанонаповнювачі, дисперговані в полімерній матриці, які значно впливають на кінцеві фізичні властивості. У більшості досліджень для створення полімерних нанокомпозитів використовують різноманітні нанонаповнювачі різної природи: вуглецеві (графен, вуглецеві нанотрубки, сажа, фулерени), нанооксиди металів та шаруваті наносилікати (монтморилоніт, лапоніт, бентоніт) для досягнення покращених механічних, теплофізичних, електричних та газових бар'єрних властивостей [1]. Завдяки своїм унікальним фізичним властивостям вуглецеві нанонаповнювачі, зокрема вуглецеві нанотрубки (ВНТ), стали одним із найбільш перспективних наповнювачів для створення нового класу полімерних наноматеріалів [2].

Найважливішим етапом у створенні полімерних нанокомпозитів є сумісність і дисперсія нанонаповнювачів у полімерній матриці. Добре диспергований стан забезпечує максимальне зміцнення, яке впливає на сусідні полімерні ланцюги і, відповідно, на властивості всієї матриці. Тому значні зусилля вчені зосереджують на отриманні однорідної та добре диспергованої системи.

Постановка проблеми. Різні види модифікації ВНТ, зокрема ковалентна і нековалентна функціоналізація, є одними із загальноприйнятих методів вирішення проблеми їх розподілу в полімерах і розчинниках [3]. Функціоналізовані ВНТ, що володіють спорідненістю до неполярних матриць, придатні для використання в композитах на основі поліолефінів. Зокрема, до ефективних модифікаторів поліетилену належать алкільовані, фторовані та силанізовані ВНТ [4]. До ефективних типів модифікації також належить використання гібридного наповнювача, тобто суміші двох нанонаповнювачів, які, завдяки синергетичному ефекту, приводять до покращення властивостей полімерної матриці, порівняно з окремим їх використанні. Однак ці методи мають як свої переваги, так і недоліки, а підбір оптимального методу залежить від багатьох факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори роботи [5] виготовили серію композитів на основі поліпропілену, що містять 0,5 % ВНТ, методом змішування у розплаві та оцінили фактичний рівень дисперсії наповнювача в полімерній матриці. Результати підтверджують, що хімічні особливості поверхні розділу відіграють ключову роль для кінцевого розподілу наповнювача. Погано дисперговані нанотрубки в полімерній матриці демонструють у середньому як найбільшу кількість, так і найбільший розмір агломератів, що приводить до погіршення функціональних властивостей матеріалу загалом.

© Лисенков Е. А., 2022

У роботі [6] запропоновано використовувати більш екологічний та економічний спосіб функціоналізації ВНТ стеаратом титану. Функціонізація ВНТ стеаратом титану сприяє збільшенню їх спорідненості до полімерної матриці на основі ПЕ та ефективному використанню в композитах з підвищеною твердістю, зносостійкістю та вологістю. Подібні результати з початковими (нефункціоналізованими) ВНТ можуть бути досягнуті при концентраціях, які на порядок перевищують концентрації функціоналізованих ВНТ.

Автори роботи [7] запропонували метод модифікації ВНТ за допомогою іншого нанонаповнювача – нанорозмірної сажі. Суміші ВНТ та сажі вводили у матрицю поліетилену низької густини методом компаундування з розплаву. Для всіх досліджуваних матеріалів спостерігалася хороша дисперсія та розподіл вуглецевих нанонаповнювачів, яка сприяла підвищенню модуля Юнга, що збільшувався зі зростанням кількості вуглецевих нанонаповнювачів.

Альтернативним підходом до покращення дисперсності ВНТ у полімерній матриці є нековалентна модифікація нанотрубок. Один із найбільш продуктивних методів покращення розподілу ВНТ був запропонований авторами роботи [8]. Модифікацію ВНТ проводили нехімічним способом за допомогою поліетиленгліколю (ПЕГ). У результаті такої модифікації утворюються фізичні зв'язки між поверхнею нанотрубки та полярною макромолекулою ПЕГ. При цьому автори стверджують, що дисперсія та стабільність ВНТ, нековалентно функціоналізованих за допомогою ПЕГ, були значно покращені

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Отже, однією із ключових проблем сучасного полімерного матеріалознавства є створення матеріалів із наперед заданими та покращеними функціональними характеристиками. Для цього створюються полімерні нанокомпозити, кінцеві характеристики яких значно залежать від розподілу наповнювача. Хімічна функціоналізація нанонаповнювачів, зокрема вуглецевих нанотрубок, є технологічно складною через велику кількість стадій та використання дорогих та/або токсичних реагентів. Альтернативний підхід до покращення дисперсності наповнювача у матриці також має свої недоліки. Так, наприклад, Paszkiewicz та ін. [7] показали, що модифікація ВНТ за допомогою наночастинок сажі приводила до зниження міцності на розрив отриманих нанокомпозитів зі збільшенням їх концентрації. Також не спостерігалося додаткового покращення механічних, електричних та теплофізичних властивостей нанокомпозитів при введенні гібридного наповнювача. Існують методи нековалентної модифікації наповнювача, проте залишається не вивченим, яким чином така модифікація впливатиме на кінцеві властивості матеріалу на основі термопластичних поліолефінів, наприклад поліетилену.

Мета статті. Метою цієї роботи є поліпшення функціональних характеристик полімерних нанокомпозитних матеріалів на основі поліетилену шляхом нековалентної модифікації введених до їх складу вуглецевих нанотрубок.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

1. Отримати нанокомпозитні матеріали, наповнених немодифікованими та ПЕГ-модифікованими ВНТ.

2. Вивчити вплив нековалентної модифікації ВНТ за допомогою поліетиленгліколю на мікроструктуру отриманих нанокомпозитних матеріалів.

3. Дослідити електричні властивості матеріалів зі ВНТ різної модифікації.

4. Дослідити механічні характеристики отриманих матеріалів.

Експериментальна частина. Для дослідження використовували матеріали на основі поліетилену високої густини, наповнені модифікованими та немодифікованими багатошаровими вуглецевими нанотрубками.

Матеріали. Поліетилен високої густини (ПЕВГ), виробництва SABIC®HDPE Eurotrubplast Holding Company Ltd Trusthose (Саудівська Аравія), був обраний полімерною матрицею для приготування дослідних зазків ($T_{пл} \approx 415$ К).

Для дослідження використовували різні серії немодифікованих та нековалентно модифікованих вуглецевих нанотрубок. Для нековалентної модифікації ВНТ використовували поліетиленгліколь.

Поліетиленгліколь (ПЕГ-1000), $HO[\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}O\text{-}]_nH$ ($n \approx 22$) молекулярної маси $M_w = 1000$, виробництва компанії Aldrich. При $T = 298$ К ПЕГ-1000 є твердою речовиною з густиною $\rho = 1093$ кг/м^3. Температура плавлення $T_{пл} \approx 308\text{-}312$ К.

Багатошарові вуглецеві нанотрубки (ВАТ «Спецмаш» (Україна)) виготовлені методом CVD з використанням *FeAlMo* як каталізатора. На поверхні ВНТ наявні гідроксильні, карбоксильні та лактонні функціональні групи. Довжина нанотрубок становила (5÷10) мкм, діаметр 18-20 нм, а питома площа поверхні – 190 м^2/г [9].

Нековалентну модифікацію ВНТ проводили за схемою, наведеною на рис. 1. ПЕГ-1000 розчиняли у воді у співвідношенні 1:5. Після розчинення додавали ВНТ, при цьому співвідношення ПЕГ-ВНТ становило 1:3. Після цього суміш змішували за ультразвукового диспергатора УДЗН А-650. Диспергація тривала неперервно протягом 10 хв на частоті 22 кГц, потужність ультразвуку становила 100 Вт. На завершальному етапі проводили випарювання води.

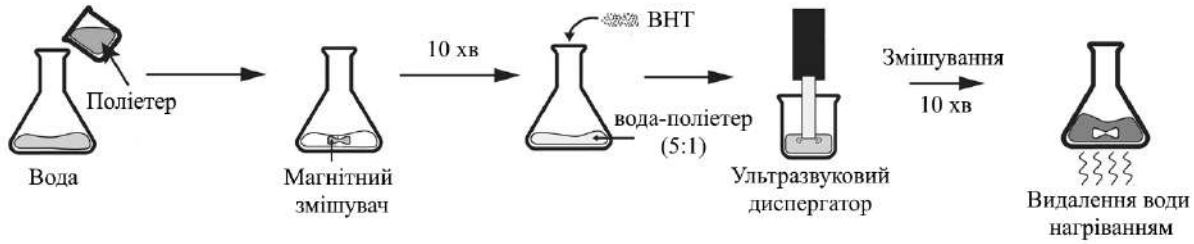


Рис. 1. Схема модифікації ВНТ

Для встановлення впливу модифікації на розподіл нанотрубок у полімерній матриці та кінцеві функціональні властивості готували дві серії полімерних нанокомпозитів на основі поліетилену. Зразки першої серії містили не модифіковані ВНТ, а другої – ВНТ, які були нековалентно модифіковані. Вміст ВНТ варіювали від 0,5 до 5 мас. %.

Виготовлення матеріалів. Композитні зразки були виготовлені методом екструдування (механічного перетирання у розплаві) за допомогою поршневого екструдера з подальшим охолодженням за н. у. Основною перевагою поршневих екструдерів над шнековими є можливість варіювати час змішування частинок наповнювача з розплавленою полімерною матрицею, після чого можна сформувати досліджуваний зразок у вигляді або пластини, або нитки.

Технологія виготовлення досліджуваних матеріалів приведена нижче [10]. Після попередньої підготовки компонентів композиційного матеріалу з використанням методу механічного змішування суміш завантажувалася в екструдер (рис. 2). Форма нагрівалася до 200 °С. Обертання поршня забезпечує змішування розплаву полімерного композиту за рахунок власної відносно високої в’язкості полімеру.

Експериментально встановлено, що найбільш рівномірне змішування частинок наповнювача у матриці відбувається протягом 10 хв. При подальшому збільшенні часу змішування відбувається часткова деструкція полімеру. Через 10 хв у нижній частині прес-форми відкривався отвір та не вимикаючи обертання поршня поступово збільшується тиск поступального руху. Зсувні напруги, які виникали, змушували розплав полімерного композиту проходить крізь отвір (діаметр ~ 2 мм). Після чого отриманий матеріал у ниткоподібній формі поміщали у перс-форму для гарячого пресування, де задавали відповідну форму досліджуваного зразка.

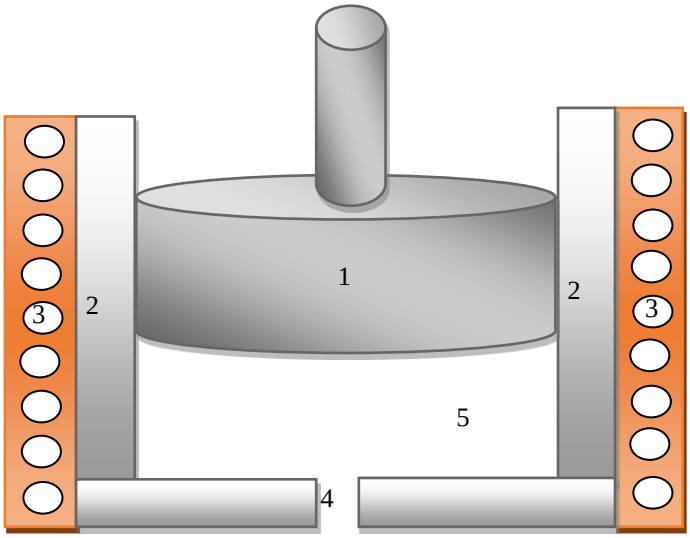


Рис. 2. Схематичне зображення поршневого екструдера:
1 – поршень, який обертається; 2 – циліндрична основа; 3 – нагрівач;
4 – отвір в основі циліндричної форми; 5 – порошкоподібний композит

Методи дослідження. Дослідження мікроструктури отриманих матеріалів проводили за допомогою цифрового оптичного мікроскопа SIGETA MB-303 (Україна), який обладнано цифровою відеокамерою SIGETA DCM-800 (Україна). Для проведення досліджень матеріали у розплавленому стані поміщали між двома плоскопаралельними скляними пластинками, відстань між якими становила 80 мкм. Для отримання інформації про фрактальність структури кластерів із ВНТ, отримані мікрознімки обробляли використовуючи програму ImageJ v1.41.

Електропровідність отриманих матеріалів досліджували методом імпедансної спектроскопії, реалізованого на базі вимірювача імітансу Е7-20 (Білорусь). Використовували двоелектродний метод вимірювання електропровідності. Товщина зразків варіювалась від 1 до 2 мм. Діаметр електродів становив 15 мм.

У роботі проведено дослідження руйнівних напружень при розтягу (міцність на розрив). Розміри зразків, що досліджували: довжина $l = 100 \pm 2$ мм, діаметр $d = 2 \pm 0{,}3$ мм. Дослідження впливу вмісту наповнювача на міцність на розрив проводили з використанням автоматизованої розривної машини УМ-5 (Україна) (модифікованої високоточними датчиками тиску та переміщення) за швидкості навантаження $\upsilon = 5$ Н/с. Похибка вимірювання становила не більше 3 %.

Результати досліджень. На рис. 3 наведені мікроскопічні зображення немодифікованих ВНТ та ПЕГ-модифікованих ВНТ. Із фотографій видно, що немодифіковані ВНТ утворюють великі та щільні агрегати, тоді як нековалентно модифіковані ВНТ мають більш рівномірний розподіл. Можна побачити, що більш рівномірний розподіл модифікованих ВНТ є масштабно-інваріантним, тобто характер розподілу не залежить від масштабування при отриманні мікрофотографій.

З рис. 3 також видно, що у випадку немодифікованих ВНТ при вмісті 0,75 % утворюються щільні агрегати, які частково контактують між собою. Оскільки прямого контакту між кластерами не спостерігається, можна припустити, що при такому наповненні не відбудеться різкої зміни властивостей системи. У випадку модифікованих ВНТ спостерігається велика кількість контактів між кластерами нанотрубок, що, очевидно, приведе до зміни властивостей у цьому концентраційному діапазоні наповнювача.

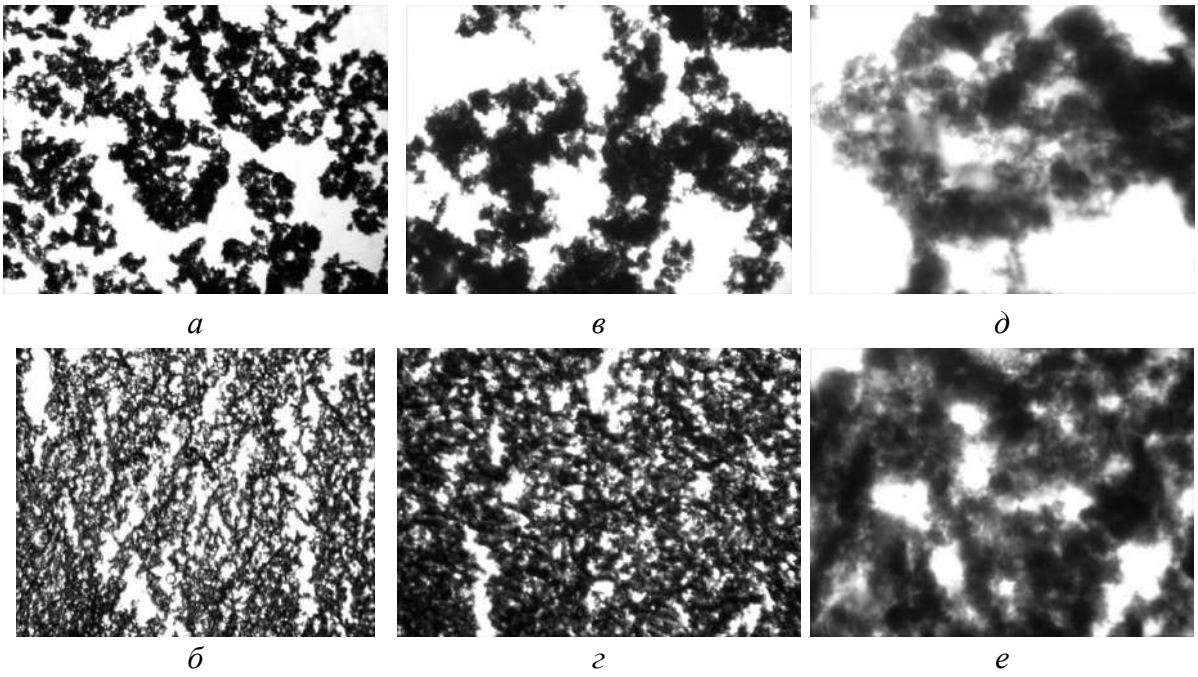


Рис. 3. Мікрофотографії систем, які містять не модифіковані ВНТ (а, в, д), та ПЕГ-модифіковані-ВНТ (б, г, е). Збільшення а, б – ×40; в, г – ×100, д, е – ×400. Вміст ВНТ різних типів у полімерні матриці становив 0,75 %

Електричні властивості. Полімерні нанокомпозитні матеріали, які містять ВНТ, володіють електропровідними властивостями та завдяки гнучкості й нанорозмірам нанотрубок, характеризуються дуже низькою критичною концентрацією (порогом перколяції) [11].

На рис. 4 наведена залежність питомої електропровідності при постійному струмі від вмісту наповнювача для досліджуваних матеріалів на основі поліетилену. Стрибкоподібна зміна питомої електропровідності у концентраційному інтервалі ВНТ від 0,5 до 1 % пов’язана з явищем перколяції. При досягненні критичної концентрації спостерігається стрибок питомої електропровідності на 6-7 десяткових порядків. Такий ефект пояснюється утворенням у нанокомпозитній системі електропровідної сітки із ВНТ, які контактуючи між собою пронизують увесь об’єм матеріалу.

З рис. 4 також видно, що модифікація ВНТ значно впливає як на характер залежності, так і на абсолютні значення питомої електропровідності досліджуваних матеріалів. При використанні немодифікованих ВНТ поріг перколяції становить 0,8 %. Використання ж ПЕГ-модифікованих ВНТ приводить до зниження порогу перколяції, який для даної системи становить 0,5 %. Такий ефект пов'язаний із більш рівномірним розподілом ВНТ у полімерній матриці. При цьому ймовірність утворення контактів між ВНТ стає вищою, тому критична концентрація наповнювача, при якій спостерігається різкий стрибок електропровідності значно знижується. Проте, аналізуючи загальні рівні питомої електропровідності для обох систем, можна побачити обернену залежність: після досягнення порогу перколяції для немодифікованих ВНТ спостерігається на порядок вищий рівень питомої електропровідності у порівнянні з ПЕГ-модифікованими ВНТ. Такий ефект можна пояснити тим, що у випадку немодифікованих ВНТ утворюються щільні агрегати, де ймовірність прямих контактів між ВНТ вища. У випадку модифікованих ВНТ, макромолекули ПЕГ, які розміщені на поверхні нанотрубки, перешкоджають їх прямому дотику, а електропровідність реалізується за механізмом тунелювання.

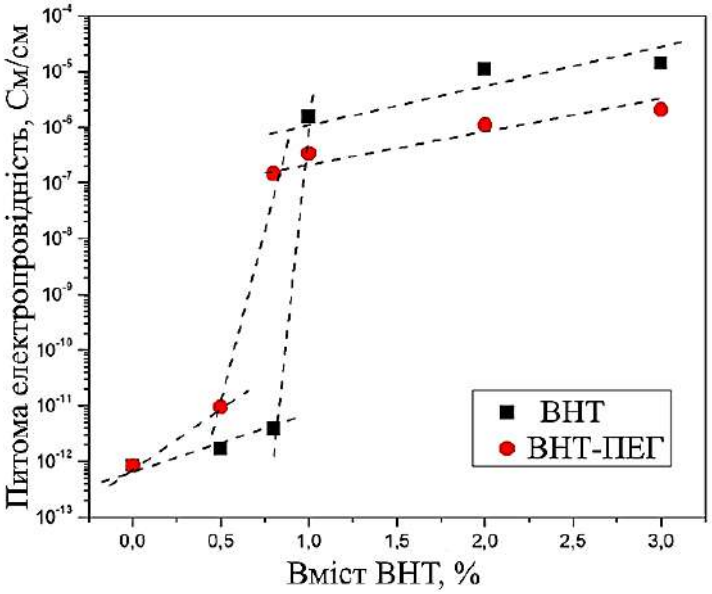


Рис. 4. Залежність питомої електропровідності при постійному струмі для системи на основі поліетилену від вмісту немодифікованих (ВНТ) та модифікованих (ВНТ-ПЕГ) нанотрубок при Т = 293 К

Механічні властивості. Крім впливу на мікроструктуру та електричні властивості, модифікація ВНТ приводить до значного поліпшення механічних характеристик отриманих матеріалів. Для вивчення впливу модифікації наповнювача на механічні характеристики системи ПЕВГ-ВНТ проводили дослідження межі міцності (на розрив) отриманих матеріалів. На рис. 5 приведена залежність межі міцності (σ_p) від вмісту ВНТ різної модифікації. З отриманої залежності видно, що зі збільшенням вмісту наповнювача межа міцності системи зростає.

На рис. 5 показано, що зі зростанням вмісту немодифікованих ВНТ, межа міцності досліджуваних систем зростає з 30,5 МПа для ненаповненого ПЕВГ до 38,8 МПа для системи ПЕВГ-5 % ВНТ. Зростання механічних характеристик в отриманих матеріалах можна пояснити внеском від наповнювача, який має більшу міцність, ніж полімерна матриця.

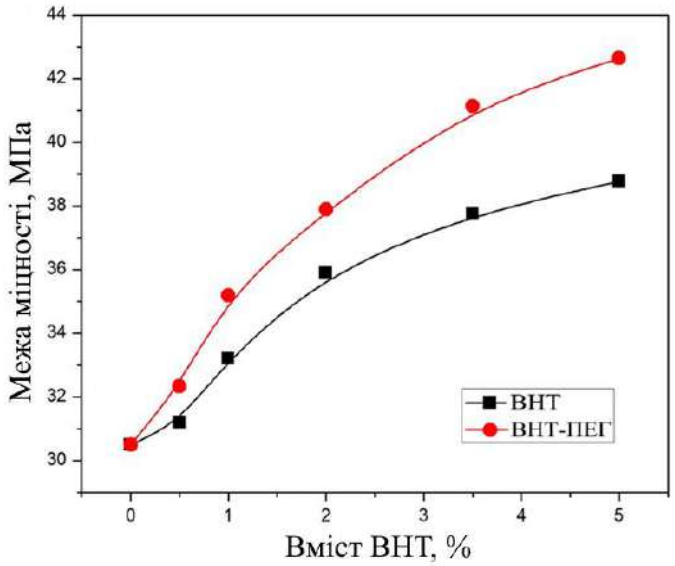


Рис. 5. Залежність межі міцності від вмісту ВНТ для матеріалів на основі поліетилену

З рис. 5 також видно, що зростання межі міцності спостерігається і для систем, які містять ПЕГ-модифіковані ВНТ. При цьому межа міцності зростає до 43 МПа при 5 % вмісті ВНТ. Так відмінність у значеннях міцності пояснюється кращим розподілом модифікованих ВНТ у полімерній матриці в порівнянні з немодифікованими нанотрубками. На відміну від електропровідності, де необхідний безпосередній контакт між нанотрубками, для покращення механічних властивостей ключову роль відіграє міжфазний шар між матрицею та наповнювачем. У випадку ПЕГ-модифікації відбувається збільшення частки такого міжфазного шару через зростання сумарної поверхні дотику між матрицею та нанотрубками.

Висновки. Розглянуті в роботі питання щодо покращення функціональних характеристик полімерних нанокомпозитних матеріалів шляхом нековалентної модифікації вуглецевих нанотрубок є досить актуальними. Їх вирішення дозволяє в перспективі створювати конструкційні матеріали різного призначення.

Також виконані дослідження дозволяють стверджувати наступне. Нековалентна функціоналізація ВНТ за допомогою обробки поліетиленгліколем призводить до кращого розподілу нанотрубок у полімерній матриці. При цьому великі щільні агрегати, які характерні для немодифікованих ВНТ, стають більш розпушеними, що збільшує доступну поверхню нанотрубок для контакту із матрицею полімеру. Встановлено, що для систем, які містять нефункціоналізовані ВНТ характерний вищий поріг перколяції та вищий рівень електропровідності, тоді як при використанні ПЕГ-модифікованих ВНТ поріг перколяції і електропровідність є нижчими. Показано, що різний характер розподілу нанотрубок, який залежить від їх модифікації значно впливає на механічні властивості матеріалів, зокрема на межу міцності. Встановлено, що при використанні модифікованих ВНТ міцність на розрив зростає з 38,8 до 43 МПа у порівнянні із немодифікованими ВНТ.

Список використаних джерел

1. Ehsani M. Structure–Function Relationships of Nanocarbon/Polymer Composites for Chemiresistive Sensing: A Review / M. Ehsani, P. Rahimi, Y. Joseph // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P. 3291.

2. A review of the interfacial characteristics of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes / J. Chen, B. Liu, X. Gao, D. Xu // RSC Adv. – 2018. – Vol. 8. – Pp. 28048-28085.

3. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review / P.-C. Ma, N. A. Siddiqui, G. Marom, J.-K. Kim // Composites: Part A. – 2010. – Vol. 41. – Pp. 1345–1367.

4. Dodecylamine functionalization of carbon nanotube to improve dispersion, thermal and mechanical properties of polyetylene based nanocomposites / F. V. Ferreira, W. Franceschi, B. R. Meneces et. al. // Appl. Surf. Sci. – 2017. – Vol. 410. – P. 266.

5. Dispersion of carbon nanotubes in melt compounded polypropylene based composites investigated by THz spectroscopy / R. Casini, G. Papari, A. Andreone, et. al. // Optics Express. – 2015. – Vol. 23, № 14. – P. 18181.

6. Polymer composites based on functionalized carbon nanotubes / T. P. Dyachkova, D. V. Tarov, E. A. Burakova et. al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 693. – P. 012011.

7. Enhanced Functional Properties of Low-Density Polyethylene Nanocomposites Containing Hybrid Fillers of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Nano Carbon Black / S. Paszkiewicz, A. Szymczyk, A. Zubkiewicz et. al. // Polymers. – 2020. – Vol. 12. – P. 1356.

8. Preparation of Ultrafiltration Membrane by Polyethylene Glycol Non-Covalent Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes: Application for HA Removal and Fouling Control / Y. Wang, M. Dong, X. Xiong et. al. // Membranes. – 2021. – Vol. 11. – P. 362.

9. Structure of Polyglycols Doped by Nanoparticles with Anisotropic Shape / E. Lysenkov, I. Melnyk, L. Bulavin, et. al. // Physics of Liquid Matter: Modern Problems. Springer Proceedings in Physics / L. Bulavin and N. Lebovka (eds.). – Switzerland : Springer International Publishing, 2015. – Pp. 165-198.

10.Lysenkov E. Determination of the effect of carbon nanotubes on the microstructure and functional properties of polycarbonate-based polymer nanocomposite materials / E. Lysenkov, L. Klymenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 4, №. 12. – P. 53-60.

11.Lysenkov E.A. Influence of modification of carbon nanotubes on microstructure and percolation behavior of the systems based on polyethylene glycol / E. A. Lysenkov, V. V. Klepko, I. P. Lysenkova // Journal of Physical Studies. – 2017. – Vol. 21 (4). – P. 4701.

References

1. Ehsani, M., Rahimi, P., & Joseph, Y. (2021). Structure–Function Relationships of Nanocarbon. Polymer Composites for Chemiresistive Sensing: A Review. *Sensors, 21*, 3291.

2. Chen, J., Liu, B., Gao, X., & Xu, D. (2018). A review of the interfacial characteristics of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes. *RSC Adv,* (8), 28048–28085.

3. Ma, P.-C., Siddiqui, N. A., Marom, G., & Kim J.-K. (2010). Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites: Part A, 41*, 1345–1367.

4. Ferreira, F.V., Franceschi, W., Meneces, B.R. et. al. (2017). Dodecylamine functionalization of carbon nanotube to improve dispersion, thermal and mechanical properties of polyetylene based nanocomposites. *Appl. Surf. Sci., 410*, 266.

5. Casini R., Papari G., Andreone A. et. al. (2015). Dispersion of carbon nanotubes in melt compounded polypropylene based composites investigated by THz spectroscopy. *Optics Express, 14*(23), 18181.

6. Dyachkova, T.P., Tarov, D.V., Burakova, E.A. et. al. (2019). Polymer composites based on functionalized carbon nanotubes. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 693*, 012011.

7. Paszkiewicz, S., Szymczyk, A., Zubkiewicz, A. et. al. (2020). Enhanced Functional Properties of Low-Density Polyethylene Nanocomposites Containing Hybrid Fillers of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Nano Carbon Black. *Polymers, 12*, 1356.

8. Wang, Y., Dong, M., Xiong, X. et. al. (2021). Preparation of Ultrafiltration Membrane by Polyethylene Glycol Non-Covalent Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes: Application for HA Removal and Fouling Control. *Membranes, 11*, 362.

9. Lysenkov, E., Melnyk, I., Bulavin, L. et. al. (2015). Structure of Polyglycols Doped by Nanoparticles with Anisotropic Shape. In L. Bulavin & N. Lebovka (eds.). *Physics of Liquid Matter: Modern Problems. Springer Proceedings in Physics.* Springer International Publishing, pp. 165–198.

10.Lysenkov, E., & Klymenko L. (2021). Determination of the effect of carbon nanotubes on the microstructure and functional properties of polycarbonate-based polymer nanocomposite materials. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 12*(4), 53–60.

11.Lysenkov, E.A., Klepko, V.V., & Lysenkova, I.P. (2017). Influence of modification of carbon nanotubes on microstructure and percolation behavior of the systems based on polyethylene glycol. *Journal of Physical Studies, 4*(21), 4701.

Отримано 25.01.2022

UDC 538.9

Eduard Lysenkov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Intellectual Information Systems
Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv)
E-mail: ealysenkov@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-1369-4609
ResearcherID: R-2601-2019. **SCOPUS Author ID:** 39761976100

THE EFFECT OF CARBON NANOTUBES MODIFICATION ON MICROSTRUCTURE AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF POLYMER NANOCOMPOSITES BASED ON POLYETHYLENE

To expand the operational characteristics of polymer materials, nanofillers are introduced into their composition, one of the most promising is carbon nanotubes. However, the creation of such nanocomposite materials is associated with a number of difficulties, in particular with the need to evenly distribute the filler in the polymer matrix.

One of the promising directions for solving the distribution problem is the functionalization of carbon nanotubes using various methods. Each method has its advantages and disadvantages. Most of them lead to the growth of only certain properties of materials, but their application is an expensive and time-consuming process.

The analysis of research and publications in the field of improving the functional characteristics of polymer nanocomposite materials showed that the issue of non-covalent modification of carbon nanotubes and their use as a filler for the creation of structural materials is currently receiving little attention in the scientific literature.

The purpose of this work is to improve the functional characteristics of polymer nanocomposite materials based on high-density polyethylene by means of non-covalent modification of carbon nanotubes introduced into their composition.

The scientific article presents the results of studies of the microstructure and functional characteristics of polymer nanocomposite materials based on polyethylene by introducing modified carbon nanotubes into their composition. In order to improve the properties of the materials, nanotubes were modified using polyethylene glycol. Using the methods of optical microscopy, impedance spectroscopy and mechanical tests the microstructure, electrical and mechanical characteristics of polymer nanocomposite materials were investigated. It is shown that the non-covalent functionalization of CNTs by means of treatment with polyethylene glycol leads to a better distribution of nanotubes in the polymer matrix and an improvement of the electrical and mechanical properties of polyethylene-based nanocomposite materials.

Keywords: *carbon nanotubes; polymer nanocomposite; conductivity; mechanical strength.*

Fig.: 5. References: 11.

Лисенков Е. Вплив модифікації вуглецевих нанотрубок на мікроструктуру та функціональні властивості полімерних нанокомпозитів на основі поліетилену. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 22-30.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-31-37
УДК 621.791.754.3

Анатолій Жерносєков[1], Віктор Федорчук[2], Олег Новомлинець[3]

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

[2]кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)
E-mail: vicf@ukr.net. **ORCID:** https:// orcid.org/0000-0002-9929-3231
ResearcherID: W-1322-2017. **Scopus Author ID:** 6701617519

[3]доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технологій зварювання та будівництва, ректор
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: oon1@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0774-434X
ResearcherID: F-8166-2014. **Scopus Author ID:** 56938958300

УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ІМПУЛЬСІВ СТРУМУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Проведені дослідження щодо управління параметрами та формою струму при імпульсно-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів плавким електродом в інертному газі. Розробка сучасного електрозварювального устаткування, у тому числі джерел живлення дуги плавкого електрода, дозволить суттєво підвищити ефективність процесу. Особливість застосування такого обладнання пояснюється виникненням багатьох комбінованих та гібридних технологій зварювання із застосуванням імпульсної дуги плавкового електрода, наприклад, лазерно-дугових, плазмово-дугових. Одержані залежності можуть бути використані для розробки синергетичного устаткування для імпульсно-дугових процесів.

Ключові слова: *дугове зварювання; плавкий електрод; алюмінієві сплави; імпульси струму; управління; джерела живлення.*

Табл.: 1. Рис.: 5. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Імпульсно-дугове зварювання (ІДЗ) плавким електродом посідає одне з провідних місць з-поміж дугових способів при виготовленні конструкцій з алюмінієвих сплавів [1; 2], зокрема різних просторових положеннях виробів відповідального призначення. Кероване імпульсно-дугове перенесення металу електродного дроту є кращим з погляду підвищення коефіцієнта розплавлення електродного металу. Краплі розплавленого металу електродного дроту, при правильному підборі параметрів імпульсів, мають малий діаметр, не деформуються, випаровування з їх поверхні мінімальне, а перехід легуючих елементів з електродного дроту у зварювальну ванну максимальний. Тому актуальними залишаються питання поліпшення ефективності імпульсно-дугового зварювання шляхом створення нового устаткування з розширеними можливостями управління параметрами процесу.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток сучасного матеріалознавства потребує комплексного вирішення проблем щодо з'єднання матеріалів. Сплави на основі алюмінію були одними з перших, де імпульсно-дугове зварювання плавким електродом в інертних газах знайшло застосування. У порівнянні з аргонодуговим зварюванням неплавким електродом тут більш повно відбувається руйнування окисної плівки, відсутні вольфрамові включення. Такі переваги способу, як можливість зварювання в усіх просторових положеннях при виконанні монтажних швів (кероване крапельне перенесення металу електрода), зменшення тепловкладання в метал зварного шва за рахунок низького значення середнього струму зварювання, а також підвищення швидкості зварювання дозволили активно впроваджувати імпульсно-дугове зварювання плавким електродом в інертних газах алюмінієвих конструкцій різного призначення. Розробка сучасного електрозварювального устаткування, у тому числі джерел живлення дуги плавкого електрода дозволить суттєво підвищити ефективність процесу. Особливість застосування такого обладнання пояснюється також виникненням багатьох комбінованих та гібридних технологій зварювання із застосуванням імпульсної дуги плавкового електрода, наприклад, лазерно-дугових, плазмово-дугових [2-4].

© Жерносєков А. М., Федорчук В. Є., Новомлинець О. О., 2022

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переваги імпульсно-дугового зварювання плавким електродом дозволили активно впровадити цей спосіб при зварюванні сплавів алюмінію в різні галузі промисловості від суднобудування до ракетобудування [2]. Широко застосовується імпульсно-дугове зварювання на суднобудівних верфях США, ФРН, Австралії. У японській суднобудівній промисловості з використанням ІДЗ конструкцій зі сплавів на основі алюмінію виготовляють судна для перевезення природних зріджених газів, легкі пасажирські судна, високошвидкісні човни, буї, палуби катамаранів, а також судна на повітряній подушці. Продовжуються дослідження щодо розвитку технологій імпульсно-дугового зварювання в дугових та плазмово-дугових процесах [5-10].

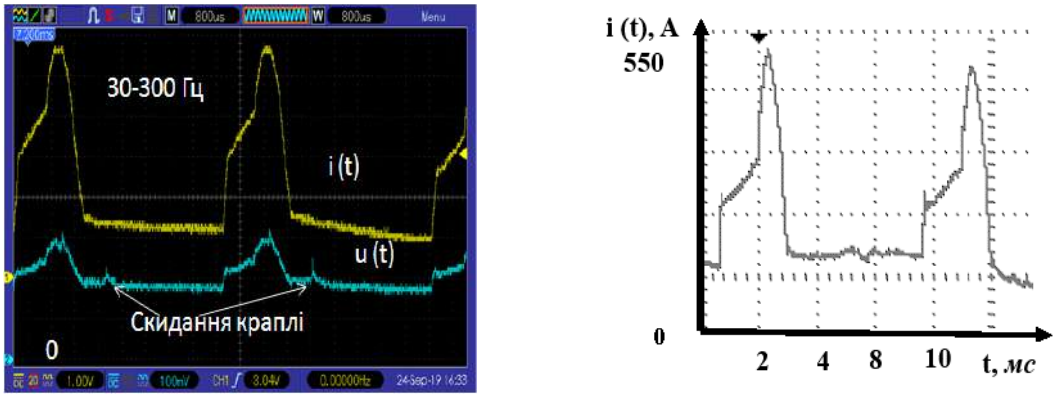
Проте залишається необхідність подальшого розвитку та удосконалення цього способу за рахунок управління параметрами процесу та розробці нового електротехнічного устаткування, зокрема джерел живлення імпульсної дуги.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проблема впливу форми імпульсів та їхніх параметрів на зварні шви і з'єднання при дуговому зварюванні плавким електродом залишається не вивченою. Це пов'язано як комерційними міркуваннями (ноу-хау), так і з широким розвитком мікропроцесорних систем управління для зварювального устаткування.

В інституті ім. Є. О. Патона НАН України накопичений досвід щодо устаткування та технології імпульсно-дугового зварювання плавким електродом у захисних газах. Розроблені джерела імпульсного струму дуги різного класу, у тому числі з можливостями зміни форми зварювального струму [11]. Такі джерела дозволяють на етапі розробки технологій зварювання ефективніше використовувати можливості управління та впливу параметрів імпульсів на кінцевий об'єкт.

Метою дослідження є розширення технологічних режимів імпульсно-дугового зварювання плавким електродом в інертних газах алюмінієвих сплавів за рахунок управління формою та параметрами імпульсів струму.

Виклад основного матеріалу. Було проведено дослідження щодо управління параметрами та формою зварювального струму на алюмінієвих сплавах марки АМг-6, 1201 та 2219. Застосовувались джерела живлення, які розроблені в ІЕЗ ім. Є. О. Патона та забезпечують регулювання форми імпульсів струму, у яких розділені процеси плавлення та перенесення металу електродного дроту [11]. На рис. 1, *а* представлені осцилограма форми імпульсів зварювального струму i (t) та імпульсів напруги на дузі u(t) при зварюванні алюмінієвого сплаву 2219, а на рис. 1, *б* форма імпульсів при зварюванні сплаву АМг-6.



а *б*

Рис. 1. Осцилограма зварювального струму i(t) та напруги на дузі u(t) імпульсно-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 2219 системи Al-Cu, дріт Св-2319 діаметром 1,6 мм. Iсер. = 180…190 А, Uсер. = 26 В, f =140 Гц, τ = 2, 2 мс (а) та осцилограма зварювального струму i(t) імпульсно-дугового зварювання алюмінієвого сплаву АМг-6, дріт Св-АМг6 діаметром 1,2 мм, Iсер. = 160 А Uсер. = 18…18,5 В (б)

На рис. 2 представлено фото наплавочних валиків на пластину алюмінієвого сплаву 2219 завтовшки 10 мм дротом Св-2319 діаметром 1,6 мм.

а *б*

Рис. 2. Макрошліф (а) та зовнішній вигляд (б) валика наплавлення без механічного очищення (зі шпінелями), виконаного імпульсно-дуговим зварюванням дротом марки 2319 на пластині зі сплаву 2219 завтовшки 10 мм

Режими автоматичного імпульсного-дугового зварювання плавким електродом алюмінієвого сплаву 2219 завтовшки 10 мм показано в таблиці.

Таблиця – Режими автоматичного імпульсно-дугового зварювання плавким електродом алюмінієвого сплаву 2219 завтовшки 10 мм

№ режиму	Діаметр електродного дроту, мм	Величина зварювального струму, А	Швидкість подавання дроту, м/год	Швидкість зварювання, м/год	Напруга на дузі, В	Частота імпульсів на дузі, Гц	Затрати аргону, л/хв
1	1,6	180…190	309	30	26	140	24…25
2	1,6	180…190	309	25	26…27	140	24…25
3	1,6	170…180	309	20	28	140	24…25
4	1,6	180…190	309	35	26	140	24…25
5	1,6	130…140	206	25	26	100	24…25

Застосування імпульсного джерела живлення з регульованою ступінчастою формою імпульсів дало змогу здійснювати імпульсний процес дугового зварювання плавким електродом на режимах з частотою імпульсів зварювального струму 100 і 140 Гц відповідно. Було встановлено, що використання режиму з частотою імпульсів 140 Гц забезпечує підвищення стабільності процесу зварювання, а також якості отриманих зварних з'єднань, це пояснюється покращенням переносу розплавленого електродного металу у зварювальну ванну. Він стає дрібно-крапельним (перенос металу стає максимально наближеним до струменевого), що у свою чергу позитивно впливає на геометрію зварного з'єднання, зменшує лускатість технологічного підсилення шва та знижує рівень пористості металу швів (рис. 3).

а *б* *в* *г* *д*

Рис. 3. Макроструктура наплавлень алюмінієвого сплаву 2219 товщиною 10 мм, отриманих при різних режимах імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом відповідно до таблиці:
а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4; д – режим 5

У результаті проведених робіт отримано технологічні режими імпульсно-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 2219 завтовшки 10 мм системи Al-Cu, які забезпечують повторюваність отримання щільних званих з'єднань зі стабільними геометричними параметрами зварного шва, без утворення гарячих тріщин, пор, підрізів та із задовільною лускатістю технологічного підсилення. При цьому встановлено, що для отримання оптимальних параметрів швів необхідно виконувати зварювання на частоті 140 Гц та швидкості зварювання 25-35 м/год.

Проведено також експериментальні дослідження технологічних можливостей способу імпульсно-дугового зварювання плавким електродом алюмінієвих сплавів 1201 за рахунок регулювання параметрів імпульсів зварювального струму і його форми. На рис. 4, 5 представлено взаємозв'язок між основними параметрами імпульсів струму при зварюванні сплаву 1201 товщиною 4 мм дротом 1201 діаметром 1,6 мм в аргоні.

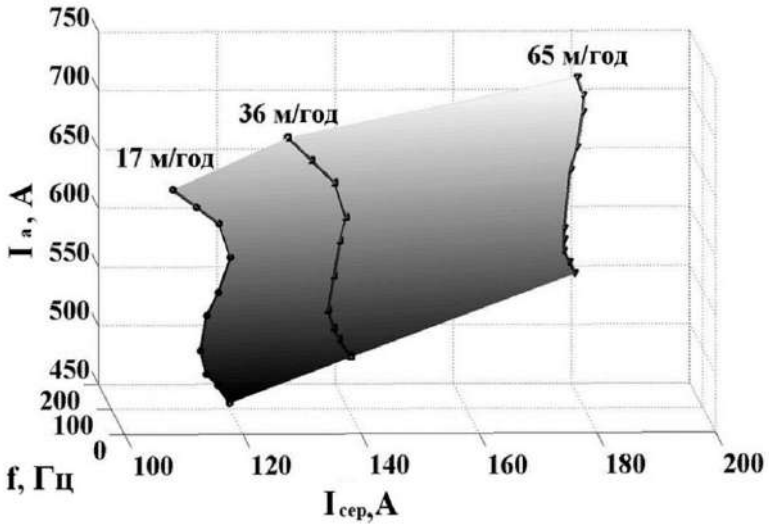


Рис. 4. Зміна параметрів при імпульсно-дуговому зварюванні алюмінієвого сплаву 1201 в аргоні. Тривалість імпульсів 2,2 мс. Середня напруга дуги та швидкість подачі дроту для швидкостей зварювання (Vзв): 17 м/год – 19,0...19,5 В ($V_{п.др}$ = 212 м/год); 36 м/год – 19,5...20,0 В ($V_{п.др}$ = 295 м/год); 65 м/год – 21,5...22,0 В ($V_{п.др}$ = 330 м/год)

На рис. 4 наведені залежності середнього значення струму зварювання ($I_{сер}$) від частоти імпульсів (f) і їхньої амплітуди (Іа). На рис. 5 наведені залежності параметрів середнього значення струму зварювання ($I_{сер}$) від частоти імпульсів і швидкості подачі зварювального дроту ($V_{п.др}$) при різних тривалостях імпульсів.

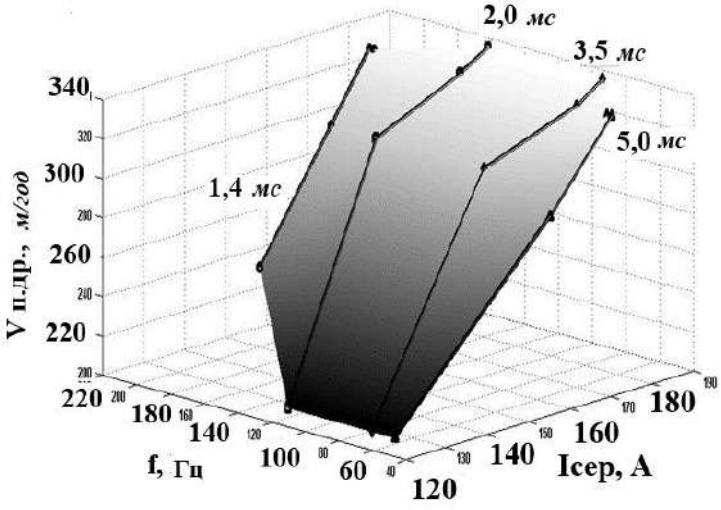


Рис. 5. Зміна параметрів при імпульсно-дуговому зварюванні алюмінієвого сплаву 1201 в аргоні. Швидкість зварювання становила при середній напрузі дуги ($U_{сер}$): 17 м/год – ($I_{сер}$ = 120…130 А; $U_{сер}$ = 20...21 В); 36 м/год – ($I_{сер}$ = 150…160 А; $U_{сер}$ = 21...22 В); 55 м/год – ($I_{сер}$ = 170…180 А; $U_{сер}$ = 21,5...22,5 В); 65 м/год – ($I_{сер}$ = 180…190А; $U_{сер}$ = 22...23 В)

Висновки. 1. Імпульсно-дугове зварювання плавким електродом займає провідне місце серед дугових способів зварювання. Воно є основою багатьох сучасних комбінованих та гібридних технологій, наприклад, лазерно-дугових, плазмово-дугових.

2. Актуальними є дослідження щодо впливу форми імпульсів струму та їх параметрів на ефективність процесу дугового зварювання, зокрема алюмінієвих сплавів.

3. Проведено експериментальні дослідження щодо управління параметрами імпульсів (тривалість, частота, амплітуда) зварювального струму і його форми. Одержані залежності можуть бути використані для розробки синергетичного устаткування для імпульсно- дугових процесів. Таке устаткування дозволить розширити діапазони регулювання параметрів імпульсів при зварюванні широкого спектра алюмінієвих сплавів різних систем легування в різних просторових положеннях та дозволить використовувати його в гібридних технологіях.

Список використаних джерел

1. Ищенко А. Я. Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов / А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур. – К. : Наукова думка, 2013. – 416 с.

2. Жерносеков А. М. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (Обзор) / А. М. Жерносеков, В. В. Андреев // Автоматическая сварка. – 2007. – № 10. – С. 48-52.

3. Ках П. Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор) / П. Ках, А. Салминен, Дж. Мартикаинен // Автоматическая сварка. – 2010. – № 6. – С. 38-47.

4. Гібридне зварювання алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 з використанням плазмової дуги і дуги плавкого електрода (Plasma-MIG) / О. А. Бабич, В. М. Коржик, А. А. Гринюк, В. Ю. Хаскін, Chunlin Dong, Shanguo Han // Автоматичне зварювання. – 2020. – № 7. – С. 13-24. – DOI: https://doi.org/10.37434/as2020.07.02.

5. Lee Hee-Keun. Effect of plasma current on surface defects of plasma-MIG welding in cryogenic aluminum alloys / Lee Hee-Keun, Park Sang-Hyeon, Kang Chung-Yun // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – № 223. – Pp. 203–215. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.008.

6. Application of pulse plasma MIG welding process to Al/steel dissimilar joining / Sarizam Bin Mamat, Shinichi Tashiro, Mohamad Najmi Masri, Seong Min Hong, Hee-Seon Bang & Manabu Tanaka // Welding in the World. – 2020. – № 64 (5). – Pp. 857–871. – DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s40194-020-00879-2.

7. Вплив режимів імпульсно-дугового зварювання на зміну параметрів шва і ЗТВ зварних з'єднань та механічні властивості низьколегованих сталей / А. В. Завдовєєв, В. Д. Позняков, С. Л. Жданов, M. Rogante, T. Baudin // Автоматичне зварювання. – 2020. – № 12. – С. 23-29. – DOI: https://doi.org/10.37434/as2020.12.03.

8. Лабур Т. М. Формування швів при зварюванні стиків з алюмінієвого сплаву АМг5М плавким електродом в монтажних умовах без застосування підкладного формуючого елемента та з ним / Т. М. Лабур, М. Р. Яворськ, В. А. Коваль // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 4. – С. 29-35. – DOI: https://doi.org/10.37434/as2021.04.05.

9. Оптимізація за розрахунковим методом режимів імпульсно-дугового зварювання з використанням високолегованого зварювального матеріалу / А. В. Завдовєєв, В. Д. Позняков, О. А. Гайворонський, А. М. Денисенко, T. Baudin // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 4. – С. 10-15. – DOI: https://doi.org/10.37434/as2021.04.02.

10. Лабур Т. М. Вплив швидкості імпульсно-дугового зварювання на структуру та властивості з'єднань алюмінієвого сплаву АМг5М, отриманих у різних просторових положеннях стиків / Т. М. Лабур, М. Р. Яворськ, В. А. Коваль // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 9. – С. 31-37. – DOI: https://doi.org/10.37434/as2021.09.05.

11. Вплив форми струму зварювання на властивості з'єднань алюмінієвих сплавів / А. М. Жерносєков, В. Є. Федорчук, Г. П. Кисла, В. А. Коваль, Ю. В. Фальченко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2022. – № 2. – С. 12-19.

References

1. Ischenko, A.Y., & Labur, T.M. (2013). *Svarka sovremennyh konstruktsiy iz aluminievyh splavov [Welding of modern structures made of aluminum alloys]*. Naukova dumka.

2. Zhernosekov, A.M., Andreev, V.V. (2007). Impulsno-dugovaia svarka plaviashchimsia elektrodom (Obzor) [Pulsed metal arc welding (Review)]. *Avtomatycheskaia svarka – The Paton Welding Journal*, (10), 48–52.

3. Kah, P., Salminen, A., & Martikainen, J. (2010). Osobennosty prymenenyia hybrydnoi lazerno-duhovoi svarky (Obzor) [Features of the use of laser-arc hybrid welding processes (Review)]. *Avtomatycheskaia svarka – The Paton Welding Journal*, (6), 38–47.

4. Babych, O.A., Korzhyk, V.M., Grynyuk, A.A., Khaskin, V.Yu., Chunlin Dong, & Shanguo Han. (2020). Hibrydne zvariuvannia aliuminiievykh splaviv 1561 ta 5083 z vykorystanniam plazmovoi duhy i duhy plavkoho elektroda (Plasma-MIG) [Hybrid welding of aluminium 1561 and 5083 alloys using Plasma-arc and consumable electrode arc (plasma-MIG)]. *Avtomatycheskaia svarka – The Paton Welding Journal*, (7), 11-22. https://doi.org/10.37434/tpwj2020.07.02.

5. Lee Hee-Keun, Park Sang-Hyeon, & Kang Chung-Yun. (2015). Effect of plasma current on surface defects of plasma-MIG welding in cryogenic aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, (223), 203–215. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.008.

6. Sarizam Bin Mamat, Shinichi Tashiro, Mohamad Najmi Masri, Seong Min Hong, Hee-Seon Bang & Manabu Tanaka. (2020). Application of pulse plasma MIG welding process to Al/steel dissimilar joining. *Welding in the World*, (64(5)), 857–871. http://dx.doi.org/10.1007/s40194-020-00879-2.

7. Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Rogante, M., & Baudin, T. (2020). Vplyv rezhymiv impulsno-duhovoho zvariuvannia na zminu parametriv shva i ZTV zvarnykh ziednan ta mekhanichni vlastyvosti nyzkolehovanykh stalei [Influence of pulsed-arc welding conditions on change of parameters of weld and haz of welded joints and mechanical properties of low-alloy steels]. *Avtomatycheskaia svarka – The Paton Welding Journal*, (12), 21-26. https://doi.org/10.37434/tpwj2020.12.03

8. Labur, T.M., Yavorska, M.R., & Koval, V.A. (2021). Formuvannia shviv pry zvariuvanni stykiv z aliuminiievoho splavu AMh5M plavkym elektrodom v montazhnykh umovakh bez zastosuvannia pidkladnoho formuiuchoho elementa ta z nym [Weld formation in consumable electrode welding of butt joints of amg5m aluminium alloy in site with a forming backing element and without it]. *Avtomatycheskaia svarka – The Paton Welding Journal*, (4), 25-30. https://doi.org/10.37434/tpwj2021.04.05.

9. Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Gaivoronskyi, O.A., Denysenko, A.M., & Baudin, T. (2021). Optymizatsiia za rozrakhunkovym metodom rezhymiv impulsno-duhovoho zvariuvannia z vykorystanniam vysokolehovanoho zvariuvalnoho materialu [Optimization by calculation method of pulsed-arc welding modes using high alloy welding material]. *Avtomatycheskaia svarka – The Paton Welding Journal*, (4), 9-13. https://doi.org/10.37434/tpwj2021.04.02.

10. Labur, T.M., Javorska, M.R., & Koval, V.A. (2021). Vplyv shvydkosti impulsno-duhovoho zvariuvannia na strukturu ta vlastyvosti ziednan aliuminiievoho splavu AMh5M, otrymanykh u riznykh prostorovykh polozhenniakh stykiv [Influence of pulse-arc welding speed on structure and properties of joints of AMg5M aluminum alloy produced in different spatial positions of butts]. *Avtomatycheskaia svarka – The Paton Welding Journal*, (9), 31-37. https://doi.org/10.37434/as2021.09.05.

11. Zhernosekov, A.M., Fedorchuk, V.Ye., Kysla, H.P., Koval, V.A., & Falchenko, Iu.V. (2022). Vplyv formy strumu zvaruvannya na vlastyvosti zednan aluminievyh splaviv [The influence of welding current pulses shape on aluminum alloy joints properties]. *Fizikohimichna mehanika materialiv – Physicochemical Mechanics Of Materials, 58*(2), 12-19.

Отримано 02.07.2022

UDC 621.791.754.3

Anatolii Zhernosekov[1], Viktor Fedorchuk[2], Oleh Novomlynets[3]

[1]Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6404-2221
Scopus Author ID: 6506774085

[2]PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of Department of Physical-Metallurgical Processes
of Welding of Light Metals and Alloys
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vicf@ukr.net. **ORCID:** https:// orcid.org/0000-0002-9929-3231
ResearcherID: W-1322-2017. **Scopus Author ID:** 6701617519

[3]Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Rector
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: oon1@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0774-434X
ResearcherID: F-8166-2014. **Scopus Author ID:** 56938958300

REGULATION OF CURRENT PULSE PARAMETERS DURING MIG WELDING OF ALUMINUM ALLOYS

Pulse-arc welding with a fusible electrode in inert gases occupies one of the leading places among arc methods in the manufacturing of structures from aluminum alloys of responsible purpose. Drops of molten metal of the electrode wire, with the correct selection of pulse parameters, have a small diameter, they do not deform, the evaporation from their surface is minimal and the transfer of alloying elements from the electrode wire to the welding bath is maximal. The problem of the influence of the pulses shape and their parameters on welds and connections during arc welding with a fusible electrode remains unstudied. Therefore, the research on improving the efficiency of pulse-arc welding through the creation of new equipment with enhanced capabilities of management of process parameters is relevant.

The development of modern electric welding equipment, including the sources of power for the welding electrode arc, will allow increasing significantly the efficiency of the process. The peculiarity of the use of such equipment is explained by the emergence of many combined and hybrid welding technologies using a pulsed welding electrode arc, for example, laser-arc, plasma-arc. The purpose of the research is to expand the technological regimes of pulse-arc welding with a fusible electrode in inert gases of aluminum alloys by controlling the shape and parameters of the current pulses.

Experimental studies on the control of current pulse parameters (duration, frequency, amplitude) and its shape during welding of aluminum alloys AMg6, 1201 and 2219 in argon have been conducted. The obtained dependencies can be used for the development of synergistic equipment for pulse-arc processes.

Such equipment will allow expanding the ranges of adjustment of pulse parameters when welding a wide range of aluminum alloys of different alloying systems in different spatial positions and will allow using it in hybrid technologies.

Keywords: *arc welding; fusible electrode; aluminum alloys; current pulses; regulation; power sources.*

Table: 1. Fig: 5. References: 11.

Жерносєков А., Федорчук В., Новомлинець О. Управління параметрами імпульсів струму при зварюванні плавким електродом алюмінієвих сплавів. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 31-37.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-38-51
УДК 621.791

Лідія Петрушинець[1], Олег Новомлинець[2], Юрій Фальченко[3], Тетяна Мельниченко[4], Леонід Радченко[5]

[1]кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Київ, Україна)
E-mail: petrushynets@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7946-3056
ResearcherID: G-2891-2016. **Scopus Author ID:** 55521777800

[2]доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технологій зварювання та будівництва, ректор
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: oon1@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0774-434X
ResearcherID: F-8166-2014. **Scopus Author ID:** 56938958300

[3]доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідуючий відділом,
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)
E-mail: falchenko@paton.kiev.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-3028-2964
ResearcherID: W-2793-2017. **Scopus Author ID:** 7801687476

[4]доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (м. Київ, Україна)
E-mail: melnychenko21@ukr.net. **Scopus Author ID:** 12802654100

[5]інженер
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)
E-mail: rleonid190@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-4235-2413

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОМІЖНИХ ПРОШАРКІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ОРТОАЛЮМІНІДУ ТИТАНУ З НІКЕЛЕВИМ СПЛАВОМ

Проведено огляд стану проблеми зварювання жароміцного сплаву ЭИ437Б на основі нікелю та ортоалюмініду титану Ti_2AlNb. Оцінено можливість використання при дифузійному зварюванні у вакуумі багатошарової та градієнтної фольги на основі систем Al-Ni і Ni-Ti. Фольги отримували методом електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі. Процес осадження полягає в пошаровій конденсації елементів на горизонтальну підкладку. Показано, що при безпосередньому зварюванні ортоалюмініду титану зі сплавом ЭИ437Б внаслідок сильної схильності матеріалів до утворення крихких фаз у стику, у зоні з'єднання спостерігається суттєве підвищення мікротвердості до 2…4 разів у порівнянні з основним матеріалом (до 11,94 ГПа). Встановлено, що використання як проміжних прошарків шаруватої фольги (Ni/Ti, Al/Ni) дозволяє суттєво знизити перепад значень мікротвердості у стику. При цьому мікротвердість у центральній частині зони з'єднання досягає 6,69…8,79 ГПа, що близько до значень мікротвердості Ti_2AlNb.

Ключові слова: *ортоалюмінид титану; нікелевий сплав; шарувата фольга; проміжний прошарок; дифузійне зварювання у вакуумі; мікроструктура; мікротвердість.*

Табл.: 2. Рис.: 12. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Алюмініди титану являють собою важливий клас сплавів, що володіють низькою щільністю та зберігають високу міцність при підвищених температурах. Це робить їх перспективними для виготовлення елементів авіадвигунів. Одним із типів таких сплавів є орторомбічні алюмініди титану на основі інтерметалідної сполуки Ti_2AlNb, які можуть застосовуватись при підвищених температурах, наприклад, у реактивних двигунах [1]. Значний вміст Nb зумовлює суттєво вищу питому вагу в Ti_2AlNb, ніж у титанових сплавів та TiAl, проте вона майже на 40 % нижча ніж у сплавів на основі Ni, що забезпечує перевагу ортосплавів перед сталями та сплавами на основі нікелю в питанні заощадження ваги [2]. Очевидно, що для застосування сплавів на основі Ti_2AlNb необхідно розробити технологію їх зварювання з іншими матеріалами, такими як сплави на основі Ni.

Постановка проблеми. Враховуючи суттєву різницю в хімічному складі та властивостях сплавів на основі Ti_2AlNb і Ni, з'єднання цих двох матеріалів є складним завданням. Наприклад, тільки титан із нікелем відповідно до фазової діаграми можуть взаємодіяти з утворенням ряду інтерметалідів, таких як Ti_2Ni, TiNi та $TiNi_3$ [3]. З чого випливає, що основною проблемою при зварюванні сплаву Ti_2AlNb з нікелевим сплавом є сильна схильність до утворення крихких фаз у зоні з'єднання, які можуть негативно вплинути на механічні

© Петрушинець Л. В., Новомлинець О. О., Фальченко Ю. В., Мельниченко Т. В., Радченко Л. М., 2022

властивості. Існуючі технології зварювання плавленням цих матеріалів не дозволяють отримувати якісні зварні з'єднання через формування крихких фаз на границі оплавлення [4–6]. Перспективним методом з'єднання цієї групи сплавів є дифузійне зварювання [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню з'єднання алюмінідів титану легованих ніобієм із нікелевими сплавами присвячено незначну кількість публікацій.

Автори [8] розглядали можливість з'єднання сплаву на основі Ti_2AlNb (Ti–24Al–15Nb–1Mo, ат. %) зі сплавом GH536 методом паяння, з використанням як припою сплаву NiCrFeSiB (Ni–7Cr–3Fe–4,5Si–3B, ваг. %). Показано, що оптимальним режимом паяння є температура 1010 ºС і витримка 5 хв. Міцність зразків на розрив при кімнатній температурі в цьому випадку дорівнює 425 МПа. Зона з'єднання з боку Ti_2AlNb складається з шарів $Ti_2Ni(Al,Nb)$, $AlNi_2Ti$ і TiB_2 з твердістю, яка в чотири рази перевищує значення притаманні основному матеріалу; центральна ділянка являє собою твердий розчин γ, у матриці якого випадають дисперсні частинки Ni_3Si; з боку нікелевого сплаву утворюється дифузійний шар з окремими частинками боридів.

У роботі [9] паяння інтерметалідного сплаву Ti–13Al–28Nb–2Mo, ваг. % з нікелевим сплавом GH536 проводили через припій Au–17,5Ni, ваг. %. Максимальну міцність на розрив при кімнатній температурі ($\sigma_в$ = 434 МПа) вдалося отримати для зразків, які були спаяні при температурі 980 ºС і тривалості процесу 15 хв. Вказується, що зона з'єднання являє собою окремі шари, типовий фазовий склад яких від сплаву Ti_3Al до GH536 змінюється таким чином: Ti_2AlNb, NiTi(Au), $AlNi_2Ti$, TiAu, $(Ni, Au)_{ss}$, Ni_3Nb, евтектика (Ni,Au) і фаза збагачена Ni. З боку інтерметалідного сплаву формується зона з мікротвердістю в 2,5 раза вищою ніж у основного металу, що пояснюється утворенням суцільного шару фаз $AlNi_2Ti$ і NiTi.

Авторами [10] був використаний припій Ag-21Cu-25Pd, ваг. % для паяння алюмініду титану Ti–24Al–15Nb–1Mo, ат. % з нікелевим сплавом GH536. Підкреслюється, що Pd з припою переважно взаємодіє з Ti та Al, що своєю чергою пригнічує утворення крихких сполук систем Al-Ni-Ti, Al-Cu-Ti, Ti-Cu, а також фази Ni_3Ti. Типовий паяний шов має шаруватий характер і в основному складається з фаз B2, Ti_2AlNb, TiPd, AlPd, $(Cu, Pd)_{ss}$, Ni_3Ti, Ti_3Pd_5, (Ag, Cu)ss, а також комплексних фаз (Cu, Fe, Cr, Ni) і (Ag, Fe, Cr, Ni). Як і в попередніх публікаціях, відмічається значне зростання мікротвердості до 2,5 раза в зоні з'єднання поблизу інтерметалідного сплаву. З'єднання, отримані при температурі паяння 980 ºС з витримкою протягом 10 хв, показали максимальну міцність на розрив при кімнатній температурі $\sigma_в$ = 404 МПа.

Автори [7] проводили дифузійне зварювання у вакуумі алюмініду титану Ti–24Al–15Nb–1Mo, ат. % зі сплавом GH536 через прошарки з нікелевої фольги та сплаву TiNiNb (Ti – 33–43Ni – 16–25Nb, ваг. %). У з'єднаннях, отриманих через нікель, відсутня взаємодія між прошарком і сплавом GH536. Проте з боку алюмініду титану іде активна реакція з утворенням кількох реакційних шарів. У зоні з'єднання відбувається формування крихких фаз Ni_2Ti, $AlNi_2Ti$ і Ni_3Ti. Максимальна міцність на зріз $\tau_{зр}$ = 207 МПа була отримана при температурі 980 °С, тиску 20 МПа, тривалості зварювання 20 хв. Використання прошарку TiNiNb сприяє зниженню дифузії Ti і Ni та формуванню меншого обсягу фаз системи Ni–Ti, проте сприяло утворенню багатокомпонентної крихкої фази (Ni, Ti, Nb, Fe, Cr). Найвищою міцністю $\tau_{зр}$ = 209 МПа володіли зразки, що були отримані при температурі 980 °С, тиску 20 МПа, витримці 10 хв.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Із наведених робіт можна зробити висновок, що для отримання якісних з'єднань Ti_2AlNb з нікелевими сплавами необхідно обмежити дифузію Ni і Ti, що може бути забезпечено шляхом використання методів зварювання в твердій фазі із застосуванням багатошарових проміжних прошарків. Також варто знизити температуру та тривалість зварювання, що має сприяти зменшенню товщини шарів крихких фаз.

Метою статті є дослідження впливу багатошарових фольг на особливості формування з'єднань ортоалюмініду титану зі сплавом на нікелевій основі при дифузійному зварюванні у вакуумі. Дослідження проводилось з метою отримання розуміння поведінки компонентів сплавів при зварюванні різнорідних жароміцних матеріалів.

Виклад основного матеріалу.

Методики досліджень, матеріали та підготовка зразків для зварювання. У роботі досліджували можливість дифузійного зварювання у вакуумі ортоалюмініду титану з нікелевим сплавом. Хімічний склад сплавів приведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сплавів Ti_2AlNb і ЭИ437Б

Сплав	Елемент %, ваг.							
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Ti_2AlNb	10,83 – 13,61	–	43,11 – 47,00	–	–	–	38,42 – 43,85	0,82 – 1,80
ЭИ437Б	0,57 – 0,88	0,37 – 0,55	2,49 – 2,63	20,62 – 21,19	0,62 – 0,73	74,72 – 75,55	–	–

Різання пластин із жароміцних матеріалів на зразки для зварювання проводили на електроерозійному верстаті. Поверхні, що підлягали з'єднанню, шліфували на алмазному крузі та знежирювали спиртом.

Зварювання алюмініду титану з нікелевим сплавом проводили на установці для дифузійної зварювання У-394М, принципова схема якої наведена на рис. 1. Рівномірність нагріву зразків забезпечували за рахунок використання електронно-променевого нагрівача кільцевої форми, який встановлювали на рівні стика. Температуру зварювання вимірювали за допомогою хромель-алюмелевої термопари. Зварювальний тиск прикладали через механізм статичного навантаження. Параметри процесу зварювання були наступні: температура зварювання $T_{зв}$ = 950 °С, зварювальний тиск $P_{зв}$ = 5 МПа, тривалість зварювання $t_{зв}$ = 5...20 хв., вакуум в робочій камері підтримували на рівні $1{,}33 \cdot 10^{-3}$ Па.

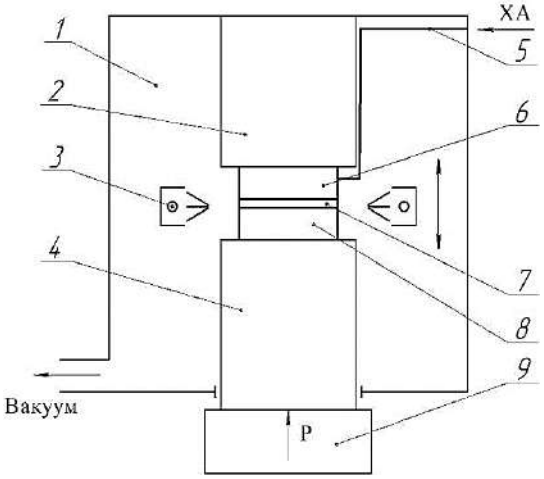


Рис. 1. Схема процесу дифузійного зварювання у вакуумі:
1 – вакуумна камера установки; 2 – верхній пуансон; 3 – електронно-променевий нагрівач; 4 – нижній пуансон; 5 – хромель-алюмелева термопара; 6, 8 – зразки, що зварюються; 7 – проміжний прошарок; 9 – механізм статичного навантаження

У роботі були використані багатошарові фольги на основі основних елементів, що входять до сплавів, які зварювались, а саме систем Al-Ni і Ni-Ti. Також досліджували можливість застосування градієнтних фольг згаданих систем, які починались і закінчувались шарами з інших елементів товщиною 3…7 мкм: Al-Ni (прошарки Cu), Al-Ni (прошарки Ti), Ni-Ti (прошарки Cu). Фольги були отримані методом електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі. Процес осадження полягає в пошаровій конденсації елементів на горизонтальну підкладку, що обертається, яка закріплена на валу установки УЕ204.

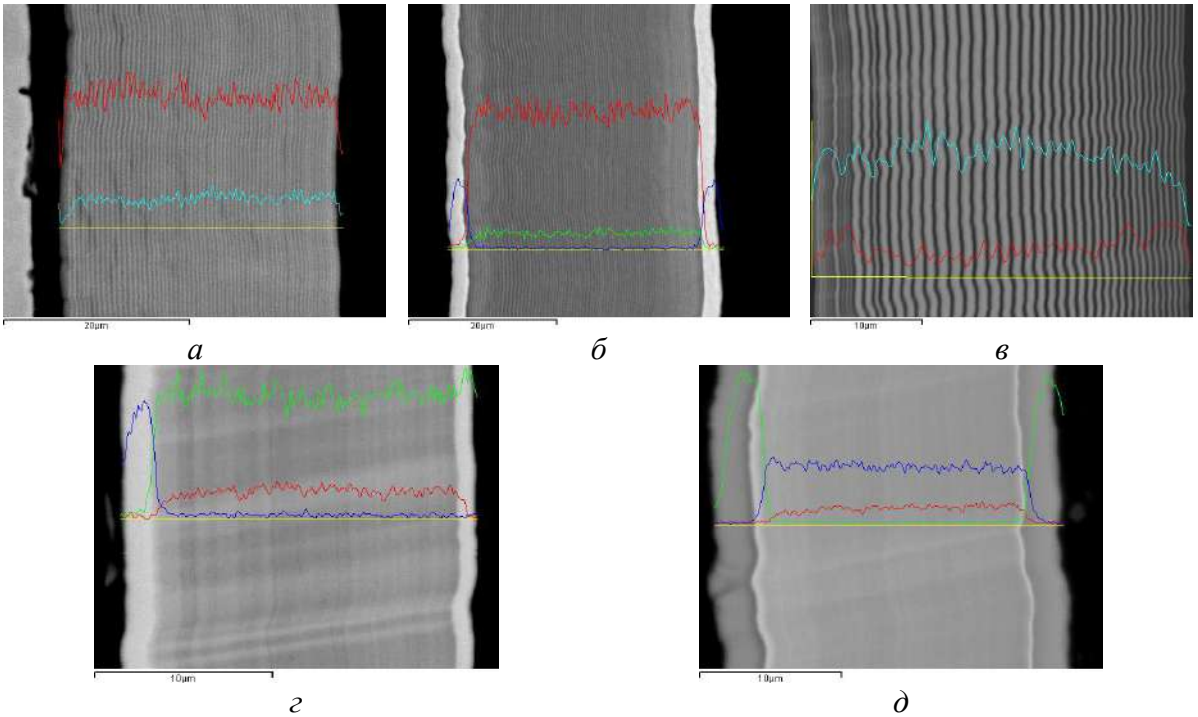
Багатошарові фольги (табл. 2) для використання як проміжних прошарків при зварюванні вибирали виходячи зі складу матеріалів, що з'єднувалися таким чином, щоб компоненти прошарку виступали легуючими елементами основного матеріалу.

Таблиця 2 – Хімічний склад наношаруватих фольг

№	Хімічний склад фольги, % ваг.				Товщина фольги, мкм
	Ti	Cu	Ni	Al	
1	67,25	–	32,75	–	30
2	78,7	100	21,3	–	35
3	–	–	86,78	13,32	35
4	–	100	87,97	12,03	20
5	100	–	84,83	15,17	25

Фольги характеризуються рівномірним розподілом елементів за товщиною. Мікроструктура фольги, що використовувалась у дослідженнях, показана на рис. 2.

Аналіз мікроструктури зварних з'єднань проводили за допомогою електронного мікроскопа CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу Oxford Inca Energy 200 для визначення хімічного складу на плоских зразках. Для цього за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального обладнання фірми Struers були приготовані шліфи поперечного перерізу фольг та зварних з'єднань.



а *б* *в* *г* *д*

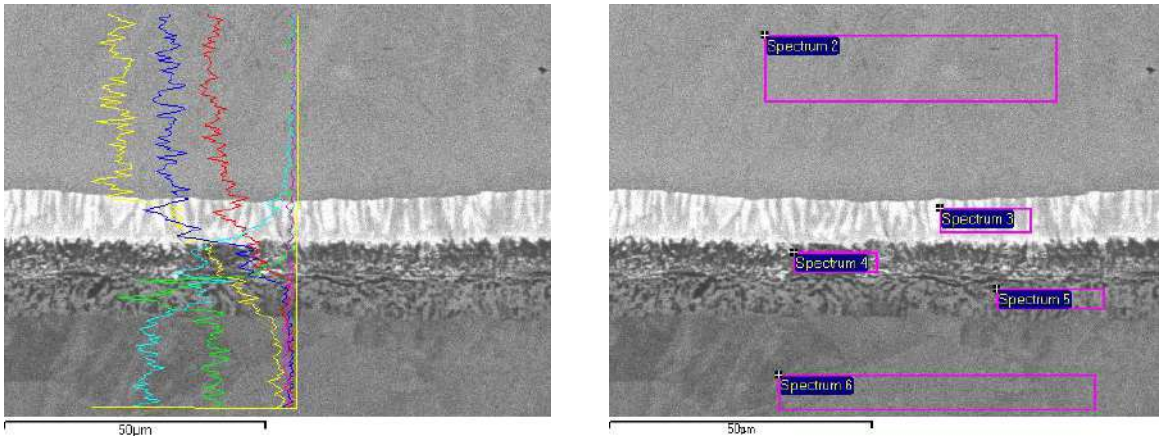
Рис. 2. Електронно-мікроскопічне зображення поперечного перерізу зразків багатошарових фольг: а – Ni-Ti, б – Cu-Ni/Ti-Cu, в – Al/Ni, г – Cu-Al/Ni-Cu, д – Ti-Al/Ni-Ti

Оцінювання мікромеханічних властивостей зварних з'єднань проводили з використанням установки «Мікрон-гама» методом автоматичного індентування алмазною пірамідою Берковича (α = 65°) при навантаженні 0,4 Н і швидкості навантаження 0,04 Н/с, з автоматично виконуваними навантаженням та розвантаженням протягом 20 с і записом діаграми в координатах Р (навантаження) – h (глибина впровадження індентора). Показники діаграми P_{max}, h_{max} та інші фіксувалися автоматично за даними двох тисяч точок на діаграмі індентування і проводилося автоматичне обчислення таких характеристик матеріалу, як твердість,

модуль Юнга, коефіцієнт пластичності [11]. З метою збільшення діапазону вимірювань дослідження проводили під кутом 15–30° до зони з'єднання. У таблицях результатів досліджень використовували такі позначення: Р – навантаження, Н; Н – значення мікротвердості за Мейєром, ГПа; Е – модуль Юнга, ГПа, $К_{пласт}$ – коефіцієнт пластичності.

Дифузійне зварювання без проміжних прошарків. У роботі досліджували здатність до дифузійного зварювання у вакуумі сплаву на основі Ti2AlNb системи Ti-Al-Nb з нікелевим сплавом ЭИ437Б. За базовий варіант було прийнято зварне з'єднання без використання проміжних прошарків. Зварювання відбувалося при температурі Тзв = 950 °С, зварювальному тиску Рзв = 5 МПа, тривалості процесу tзв = 20 хв.

У процесі дослідження мікроструктури званого з'єднання виявлено 3 зони, які відрізняються за структурою та хімічним складом (рис. 3). Перша зона (7–10 мкм) характеризується стовбчастими кристалами білого та світло-сірого кольорів. Друга та третя зони (5–6 мкм кожна) відзначається рівномірно розташованими кристалами сірого та темного кольорів зі слабо вираженою стовбчастою структурою. Вони візуально мають схожу структуру, але відрізняються за хімічним складом (рис. 3, *б, в*).



а *б*

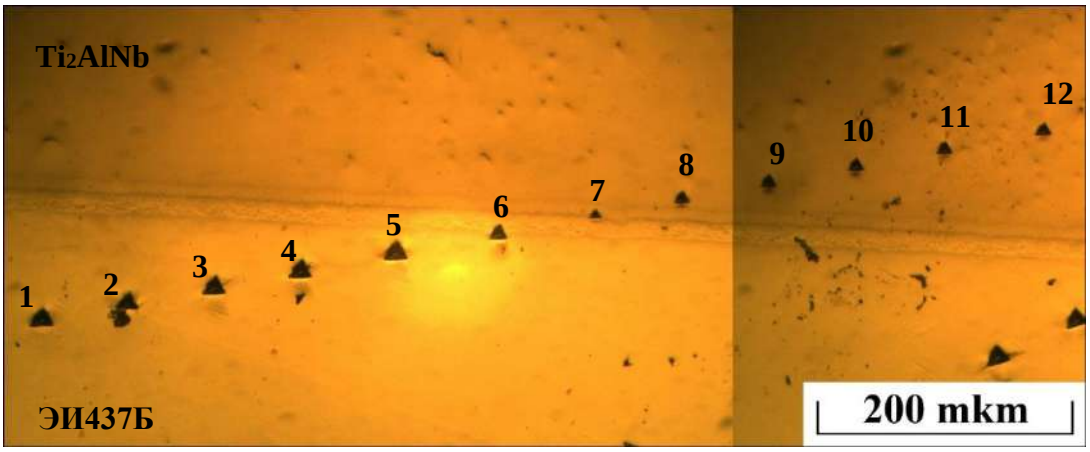
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Spectrum 2	13,29	45,81	–	–	–	40,08	0,82
Spectrum 3	10,42	30,93	0,69	–	18,77	37,44	1,74
Spectrum 4	9,19	21,42	4,35	0,42	52,30	12,32	–
Spectrum 5	1,66	11,78	24,92	–	60,23	1,41	–
Spectrum 6	0,88	2,61	20,89	0,74	74,88	–	–

в

Рис. 3. Мікроструктура (а, б) і вміст основних елементів (в) у зварному з'єднанні Ti_2AlNb + ЭИ437Б, отриманого на режимі: $Т_{зв}$ = 950 °С, $Р_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 20 хв

У стику спостерігається активна зустрічна дифузія Al, Ti і Nb у напрямку ЭИ437Б та Ni і Cr в бік алюмініду титану. При цьому W накопичується в першій зоні, де його обсяг більш ніж вдвічі перевищує значення вмісту для вихідного матеріалу. В окремих ділянках зварного з'єднання спостерігаються тріщини, які поширюються вздовж лінії з'єднання. Переважна більшість тріщин спостерігається в першому (світлому) прошарку, причому тріщини розповсюджуються тільки в межах перехідних шарів.

У зоні з'єднання спостерігається суттєве підвищення мікротвердості (з 2,31…2,96 ГПа для ЭИ437Б і 6,84…7,70 ГПа для Ti2AlNb) до 11,94 ГПа (рис. 4). Це може бути результатом як інтенсивної дифузії вольфраму до границі розділу сплавів (його вміст у перехідному прошарку вдвічі більший ніж у вихідному металі), так і результатом утворення інтерметалідів Ni3Nb та Ni_6Nb_7. Суттєве зниження коефіцієнта пластичності може вказувати саме на формування в зоні з'єднання прошарку крихких фаз.



а

№ за/п	Р, гр	Н, ГПа	Е, ГПа	$К_{пласт}$
1	40	2,58	200,2	0,941
2	40	2,96	214,6	0,937
3	40	2,57	216,3	0,945
4	40	2,53	235,7	0,950
5	40	2,31	188,8	0,944
6	40	4,27	205,5	0,907

№ за/п	Р, гр	Н, ГПа	Е, ГПа	$К_{пласт}$
7	**40**	**11,94**	**213,0**	**0,772**
8	40	7,21	167,0	0,819
9	40	6,84	167,2	0,828
10	40	7,14	163,8	0,820
11	40	7,09	163,4	0,818
12	40	7,70	161,4	0,803

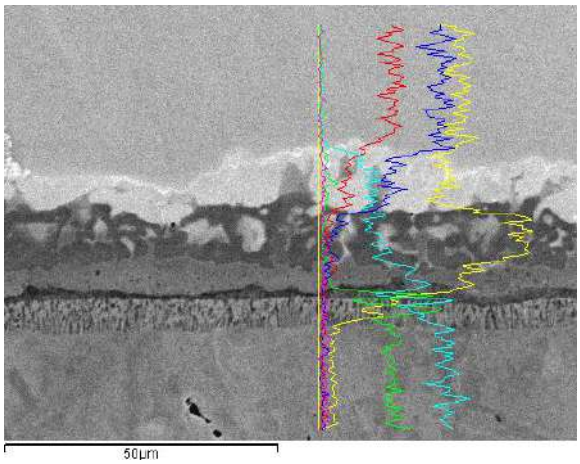
б

Рис. 4. Результати автоматичного індентування з'єднання Ti_2AlNb + ЭИ437Б, отриманого на режимі: $Т_{зв}$ = 950 °С, $Р_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 20 хв.: а – відбитки, отримані при індентуванні; б – таблиця розрахунків

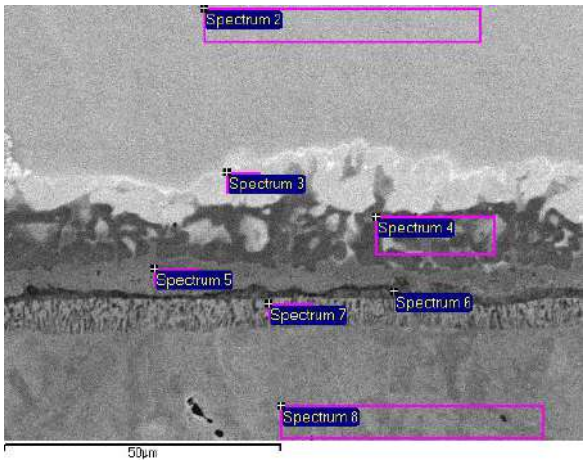
Поліпшенню умов формування зварних з'єднань може сприяти використання як проміжних прошарків багатошарової фольги.

Дифузійне зварювання з використанням багатошарових прошарків Ni/Ti. Досліджували можливість використання як проміжного прошарку багатошарової фольги системи Ni-Ti (фольга № 1, табл. 2) при зварюванні сплаву на основі Ti2AlNb з жароміцним сплавом ЭИ437Б. Параметри процесу дифузійного зварювання у вакуумі були наступні: Тзв = 950 °С, Рзв = 5 МПа, tзв = 5 хв.

Аналіз мікроструктури показав, що під час зварювання відбувається повна перекристалізація фольги Ni/Ti (рис. 5) з утворенням рідкої фази та її подальшим видаленням за межи зварного з'єднання. Кількість перехідних шарів, які візуально можна виділити на мікроструктурі з'єднань, збільшилася до п'яти, а їх загальна товщина становить 25-30 мкм, що трохи менше від товщини вихідної фольги. Зміна концентрації елементів в зоні з'єднання відбувається плавно. За рахунок складу фольги, у перехідних прошарках спостерігається підвищена концентрація титану та нікелю. Проміжний прошарок виступає бар'єром для дифузії хрому та вольфраму. Хром накопичується на границі прошарок/ЭИ437Б, де його концентрація сягає 33,98, % ваг., що на 60 % вище, ніж у вихідному металі. W взагалі не дифундує в проміжний прошарок. В окремих ділянках зварного з'єднання спостерігаються тріщини, які починаються в проміжному прошарку та розповсюджуються в Ti2AlNb.



а



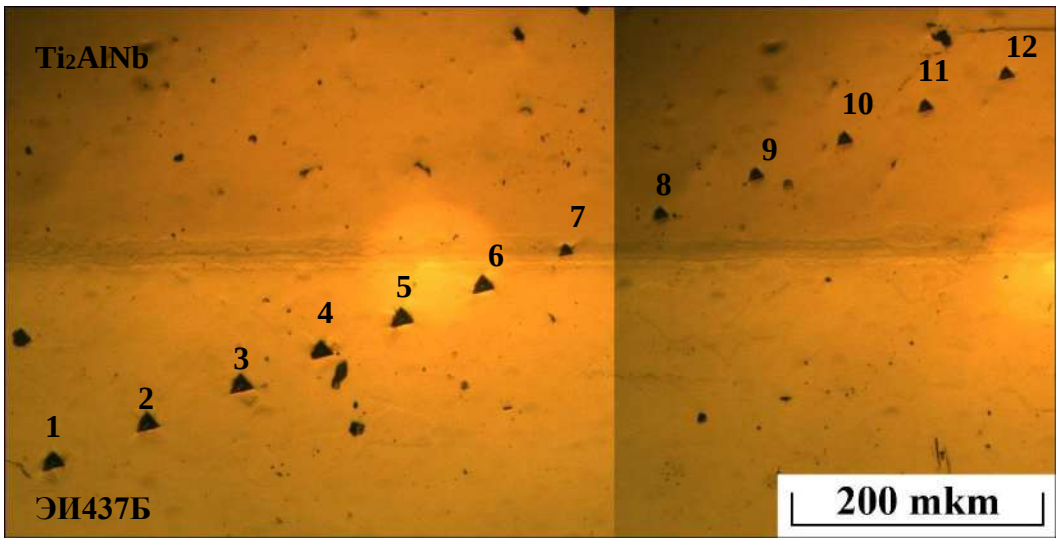
б

	Al	Ti	Cr	Ni	Nb	W
Spectrum 2	13,38	43,11	–	–	42,64	0,87
Spectrum 3	6,78	34,88	2,07	28,13	27,38	0,76
Spectrum 4	3,92	50,32	1,19	35,93	8,64	–
Spectrum 5	1,62	39,22	2,83	56,33	–	–
Spectrum 6	1,88	23,9	33,98	40,23	–	–
Spectrum 7	0,96	14,10	27,21	57,74	–	–
Spectrum 8	0,63	2,63	21,19	75,55	–	–

в

Рис. 5. Мікроструктура (а, б) і вміст основних елементів (в) у зварному з'єднанні Ti_2AlNb + ЭИ437Б, отриманого через багатошарову фольгу Ni/Ti на режимі: $T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 5 хв

Дослідження мікромеханічних властивостей з'єднання показує (рис. 6), що поряд з незначним ростом мікротвердості зони з'єднання (з 4,44…5,24 ГПа для Ti_2AlNb до 6,69 ГПа в центральній ділянці стика), спостерігається зниження значень коефіцієнту пластичності до $К_{пласт}$ = 0,765. Це може вказувати на наявність значних напружень, а також формування шарів крихких інтерметалідів. Значення модуля Юнга знаходяться на рівні основного матеріалу.



а

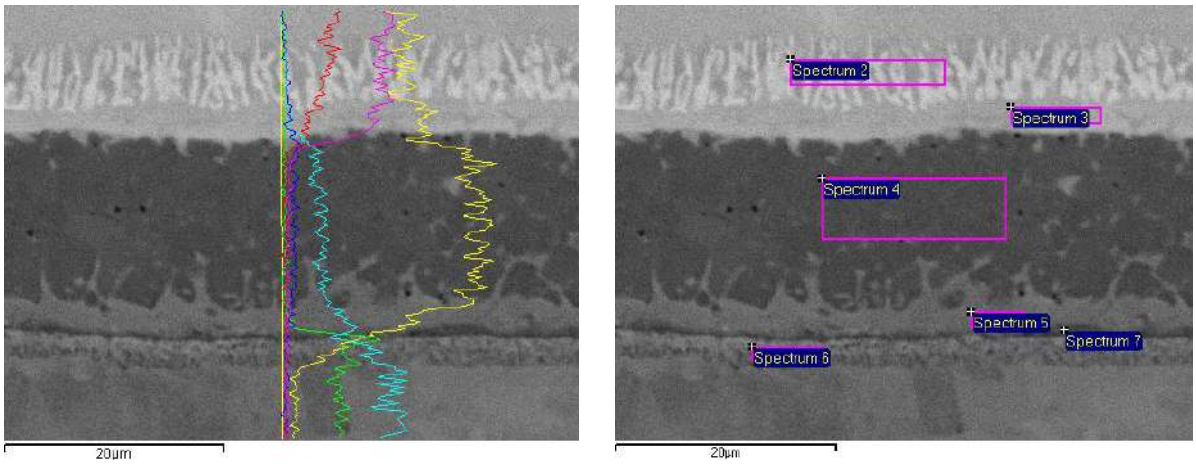
№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	$K_{пласт}$
1	40	2,25	147,3	0,931
2	40	2,08	149,6	0,937
3	40	1,77	126,8	0,936
4	40	2,14	112,1	0,914
5	40	2,16	118,7	0,918
6	40	2,27	132,0	0,922
7	**40**	**6,69**	**113,7**	**0,765**
8	40	4,44	111,1	0,831
9	40	4,50	115,4	0,835
10	40	4,45	103,4	0,818
11	40	4,92	101,8	0,799
12	40	5,24	103,7	0,791

б

Рис. 6. Результати автоматичного індентування з'єднання Ti_2AlNb + ЭИ437Б, отриманого через наношарувату фольгу Ni/Ti на режимі: $T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 20 хв.: а – відбитки, отримані при індентуванні; б – таблиця розрахунків

Дифузійне зварювання з використанням багатошарових градієнтних прошарків Cu-Ni/Ti-Cu. Дифузійне зварювання зразків Ti_2AlNb і ЭИ437Б через багатошарову градієнтну фольгу Cu-Ni/Ti-Cu (фольга № 2, табл. 2) проводили при наступних параметрах: $T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 5 хв.

Використання як проміжного прошарку фольги Cu-Ni/Ti-Cu забезпечує формування з'єднання без несуцільностей і тріщин (рис. 7).



а *б*

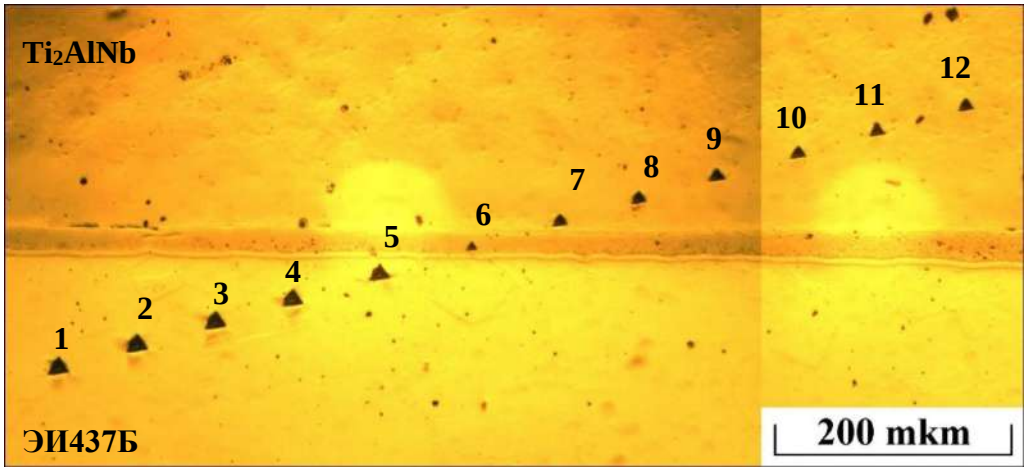
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	Nb	W
Spectrum 2	9,73	41,01	–	–	2,92	3,36	42,09	0,89
Spectrum 3	5,80	42,82	0,58	–	9,40	9,66	31,32	0,41
Spectrum 4	0,98	59,37	0,38	0,64	27,02	9,90	1,71	–
Spectrum 5	1,76	37,50	2,91	0,53	51,08	5,20	1,01	–
Spectrum 6	1,13	15,14	23,10	0,45	60,19	–	–	–
Spectrum 7	1,33	22,80	39,60	0,74	32,90	2,62	–	–

в

Рис. 7. Мікроструктура (а, б) і вміст основних елементів (в) у зварному з'єднанні Ti_2AlNb + ЭИ437Б, отриманого через наношарувату фольгу Cu-Ni/Ti-Cu на режимі: $T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 5 хв

Спостерігається повна перекристалізація фольги з формуванням шести шарів. Загальна товщина шарів між сплавами, що зварюються становить 29 мкм. Зменшення сумарної товщини перехідних шарів у порівнянні з вихідною товщиною багатошарової фольги свідчить про утворення в зоні з'єднання евтектики та видалення надлишків рідкої фази зі стику під час зварювання. Мідь, що міститься на поверхні фольги, виступає надійним бар'єром проти дифузії легуючих елементів зі сплавів в напрямку один до одного.

Так вольфрам взагалі не дифундує в проміжний прошарок. Хром накопичується в приповерхневому шарі жароміцного сплаву (39,6, % ваг.) і до поверхні Ti_2AlNb він доходить в обсязі лише 0,38…0,58, % ваг. Ніобій також повністю проходить через стик, проте на границі проміжний прошарок/ЭИ437Б його концентрація падає більш ніж у 40 разів порівняно з вихідним алюмінідом титану (з 42,09 до 1,01, % ваг.). Можна припустити, що з фольги утворилася низка сплавів системи Ni-Ti з різною концентрацією нікелю і титану легованих іншими елементами, що входять до складу вихідних матеріалів.Значення модуля Юнга має середнє значення щодо сплавів, що зварюються (рис. 8). Значне падіння коефіцієнта пластичності вказує на формування в стику шарів з низькою пластичністю у порівнянні з вихідними сплавами. У центральному найтовщому перехідному шарі зони з'єднання відбувається суттєве підвищення мікротвердості до 13,21 ГПа. Причиною цього є утворення крихкої інтерметалідної фази на основі системи Cu-Ni-Ti з домішками алюмінію (0,98, % ваг), хрому (0,38, % ваг), ніобію (1,71, % ваг.) і заліза (0,64, % ваг).



а

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	$K_{пласт}$
1	40	2,87	242,7	0,945
2	40	2,88	241,0	0,945
3	40	2,87	290,9	0,954
4	40	3,05	228,3	0,939
5	40	3,16	265,0	0,945
6	**40**	**13,21**	**197,8**	**0,736**

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	$K_{пласт}$
7	40	7,31	171,2	0,821
8	40	6,57	173,5	0,839
9	40	6,31	182,3	0,851
10	40	6,46	165,8	0,834
11	40	6,93	164,2	0,824
12	40	7,11	173,2	0,828

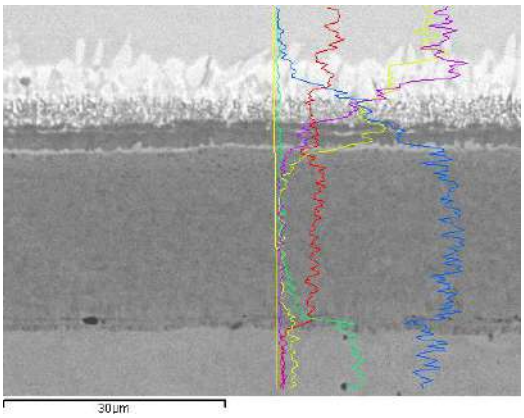
б

Рис. 8. Результати автоматичного індентування з'єднання Ti_2AlNb + ЭИ437Б, отриманого через наношарувату фольгу Cu-Ni/Ti-Cu на режимі: $T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 20 хв.: а – відбитки, отримані при індентуванні; б – таблиця розрахунків

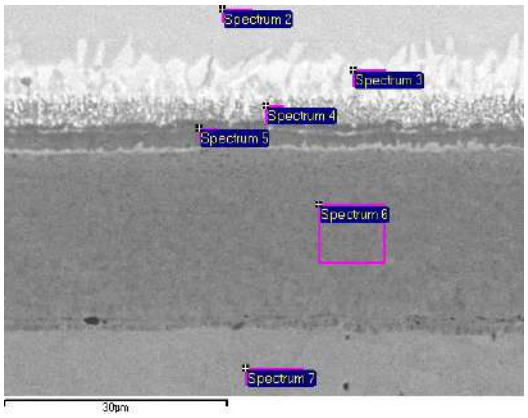
Дифузійне зварювання з використанням наношаруватих прошарків системи Al-Ni. Досліджували можливість використання як проміжного прошарку багатошарової фольги системи Al-Ni (фольга № 3, табл. 2) при зварюванні Ti_2AlNb із жароміцним нікелевим сплавом ЭИ437Б. Параметри процесу дифузійного зварювання у вакуумі були такі: $T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 5 хв.

У зоні з'єднання, отриманого через прошарок Al/Ni, спостерігається утворення серії з чотирьох перехідних шарів загальною товщиною 36 мкм. Мікроструктура, а також розподіл хімічних елементів в зоні з'єднання представлені на рис. 9. З боку жароміцного ніхромового сплаву утворився прошарок зі сплаву нікелю з інтерметалідом $AlNi_3$, що

виступає бар'єром для дифузії легуючих елементів з боку Ti_2AlNb (спектр 6, рис. 9, *б*). У деяких ділянках з'єднання, що прилягають до Ti_2AlNb спостерігаються ланцюги пор вздовж границь проміжний прошарок/основний матеріал, а також тріщини по границі проміжний прошарок/алюмінід титану.



а



б

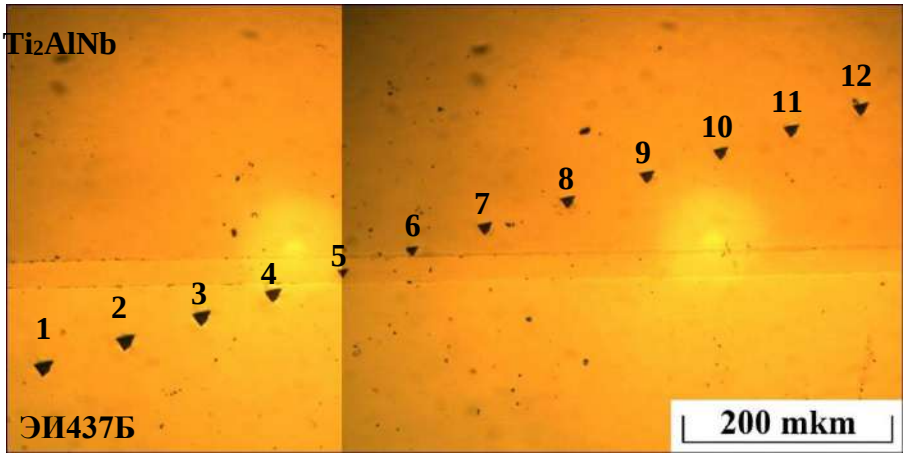
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Spectrum 2	9,19	39,17	–	–	0,60	48,96	2,08
Spectrum 3	8,14	30,41	–	–	9,00	50,57	1,88
Spectrum 4	6,69	20,42	–	–	37,16	34,17	1,55
Spectrum 5	9,59	24,07	–	–	53,31	12,07	0,95
Spectrum 6	12,74	–	–	–	87,26	–	–
Spectrum 7	0,72	2,67	20,31	0,88	75,42	–	–

в

Рис. 9. Мікроструктура (а, б) і вміст основних елементів (в) у зварному з'єднанні Ti_2AlNb + ЭИ437Б, отриманого через наношарувату фольгу Al/Ni на режимі: $T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 5 хв

Ймовірно, для фольги такого складу тривалість зварювання в 5 хв не дозволяє повністю пройти дифузійним процесам і сформувати якісне з'єднання. В результаті фольга Al/Ni виступає надійним бар'єром для дифузії в проміжний прошарок, таких елементів як Cr, Fe, W і Ti. Мікротвердість центральної частини зони з'єднання в 1,5–2 раза перевищує значення для вихідних матеріалів (8,79 ГПа проти 2,96…5,23 ГПа), коефіцієнт пластичності знаходиться на рівні сплаву Ti_2AlNb (рис. 10). Низька дифузійна активність в фользі системи Al/Ni призвела до активного утворення багатокомпонентної фази (Ti, Ni, Nb, Al, W) в приповерхневому шарі з боку алюмініду титану. У результаті цього відбулось підвищення мікротвердості даної ділянки до 9,27 ГПа і падіння коефіцієнта пластичності до 0,778.

Виходом з цієї ситуації могло б стати використання фольг системи Al-Ni з бар'єрними шарами по боках. Проте, як показали дослідження, отримати на запропонованому режимі з'єднання через градієнтну багатошарову фольгу Ti-Al/Ni-Ti (фольга № 5, табл. 2) взагалі не вдається. У випадку фольги Cu-Al/Ni-Cu (фольга № 4, табл. 2), через високий рівень дефектності (рис. 11) зразки зазвичай розпадалися при механічній обробці. З результатів проведених експериментів можна зробити висновок, що фольги системи Al-Ni з чи безбар'єрних прошарків не придатні для зварювання сплавів Ti_2AlNb і ЭИ437Б при заданому режимі зварювання ($T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 5 хв).



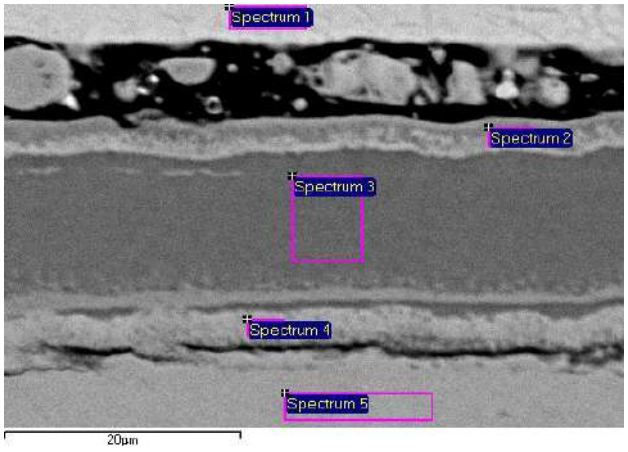
а

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	$K_{пласт}$
1	40	2,96	168,7	0,921
2	40	3,00	174,2	0,922
3	40	3,22	204,7	0,929
4	40	4,18	212,1	0,911
5	**40**	**8,79**	**225,0**	**0,833**
6	40	9,27	172,6	0,778

№ за/п	P, гр	H, ГПа	E, ГПа	$K_{пласт}$
7	40	5,83	150,6	0,836
8	40	5,58	150,2	0,842
9	40	5,33	153,7	0,850
10	40	5,23	132,6	0,833
11	40	5,25	141,3	0,842
12	40	5,26	144,7	0,845

б

Рис. 10. Результати автоматичного індентування з'єднання Ti_2AlNb+ЭИ437Б, отриманого через наношарувату фольгу Al/Ni на режимі: $T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 20 хв
а – відбитки, отримані при індентуванні; б – таблиця розрахунків



а

	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Spectrum 1	10,91	43,31	–	–	0,66	44,57	0,55
Spectrum 2	1,74	32,3	–	–	65,96	–	
Spectrum 3	21,32	2,25	–	–	76,43	–	–
Spectrum 4	0,86	24,83	0,39	–	73,92	–	–
Spectrum 5	0,6	2,84	20,69	0,66	75,21	–	–

б

Рис. 11. Мікроструктура (а) і вміст основних елементів (б) в зварному з'єднанні Ti_2AlNb + ЭИ437Б, отриманого через наношарувату фольгу Cu-Al/Ni-Cu на режимі: $T_{зв}$ = 950 °С, $P_{зв}$ = 5 МПа, $t_{зв}$ = 5 хв

На рис. 12 показано значення мікротвердості в зоні з'єднання в залежності від хімічного складу проміжного прошарку. З гістограми випливає, що при зварюванні Ti_2AlNb з ЭИ437Б без застосування проміжних прошарків в стику утворюються інтеметалідні з'єднання з мікротвердістю на рівні 11,94 ГПа. Застосування при дифузійному зварюванні багатошарових трикомпонентних фольг Cu-Ni/Ti-Cu не призводить до зниження рівня мікротвердості. Її значення в цьому випадку становить 13,21 ГПа. Використання як проміжних прошарків двоелементних фольг (Ni/Ti, Al/Ni) дозволяє суттєво знизити перепад мікротвердості в стику. При цьому значення мікротвердості в центральній частині зони з'єднання досягають значень 6,69…8,79 ГПа.

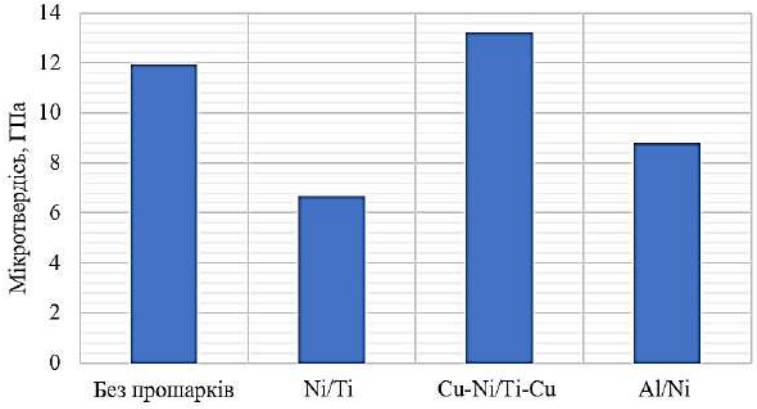


Рис. 12. Значення мікротвердості в зоні з'єднання Ti_2AlNb + ЭИ437Б залежно від хімічного складу проміжного прошарку

Висновки. Основною складністю при дифузійному зварюванні ортоалюмініду титану зі сплавом ЭИ437Б є сильна схильність матеріалів до утворення крихких фаз у стику, які можуть негативно вплинути на властивості з'єднань.

1. Встановлено, що при зварюванні без проміжних прошарків в зоні з'єднання спостерігається суттєве підвищення мікротвердості до 2…4 разів у порівнянні з основним матеріалом (до 11,94 ГПа).

2. Застосування при дифузійному зварюванні багатошарової градієнтної фольги Cu-Ni/Ti-Cu не дозволяє знизити мікротвердість зони з'єднання. Її значення знаходиться на рівні 13,21 ГПа. Причиною цього є утворення крихкої інтерметалідної фази на основі системи Cu-Ni-Ti.

3. Показано, що використання в якості проміжних прошарків двоелементної фольги (Ni/Ti, Al/Ni) дозволяє суттєво знизити перепад значень мікротвердості в стику. При цьому мікротвердість в центральній частині зони з'єднання досягає 6,69…8,79 ГПа, що близько до значень мікротвердості Ti_2AlNb.

Список використаних джерел

1. Jörg Kumpfert. Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide / Jörg Kumpfert // Advanced Engineering Materials. – 2001. – Vol. 11(3). – Pp. 851–864. – DOI: https://doi.org/10.1002/1527-2648(200111)3:11%3C851::AID-ADEM851%3E3.0.CO;2-G.

2. Alan Partridge. Processing and mechanical property studies of orthorhombic titanium-aluminide-based alloys / Alan Partridge, Edward F.J. Shelton // Air & Space Europe. – 2001. – Vol. 3-4(3). – Pp. 170–173. – DOI: https://doi.org/10.1016/S1290-0958(01)90085-1.

3. Барабаш О. М. Структура и свойства металлов и сплавов: Справочник: Кристаллическая структура металлов и сплавов / О. М. Барабаш, Ю. Н. Коваль. – К. : Наукова думк, 1986. – 599 с.

4. Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints arc welded with Ti–Nb and Ti–Ni–Nb filler alloys / Bingqing Chen, Huaping Xiongn, Bingbing Sun, Siyi Tang, Borui Du, Neng Li // Progress in Natural Science: Materials International. – 2014. – Vol. 4(24). – Pp. 313–320. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.06.003.

5. Microstructure Evolution and Tensile Properties of Ti3Al/Ni-based Superalloy Welded Joint / Bingqing Chen, Huaping Xiong, Bingbing Sun, Siyi Tang, Shaoqing Guo, Xuejun Zhang // Journal of Materials Science & Technology. – 2014. – Vol. 7(30). – Pp. 715–721. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.06.004.

6. Laser Joining of Ti3Al-Based Alloy to Ni-Based Superalloy using a Titanium Interlayer / Xiao-Long Cai, Da-Qian Sun, Hong-Mei Li, Hong-Ling Guo, Yan Zhang, Ying-ying Che // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2018. – Vol. 1. – Pp. 1163–1169. – DOI: https://doi.org/10.1007/s12541-018-0137-5.

7. Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints diffusion bonded with Ni and TiNiNb foils / Ren H.S., Wu X., Chen B., Xiong H.P., Cheng Y.Y. // Welding in the World March. – 2017. – Vol. 61, № 2. – Pp. 375–381.

8. Formation mechanism of interfacial microstructures and mechanical properties of Ti2AlNb/Ni-based superalloy joints brazed with NiCrFeSiB filler metal / Haishui Ren, Xinyu Ren, Weimin Long, Bo Chen, Shujie Pang, Huaping Xiong // Progress in Natural Science: Materials International. – 2021. – Vol. 2(31). – Pp. 310–318. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.12.009.

9. Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints brazed with AuNi filler metal / Ren H.S., Xiong H.P., Long W.M., Chen B., Shen Y.X., Pang S.J. // Journal of Materials Science & Technology. – 2019. – Vol. 9(35). – Pp. 2070–2078. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.04.015.

10. Interfacial diffusion reactions and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints brazed with AgCuPd filler metal / Ren H.S., Xiong H.P., Long W.M., Shen Y.X., Pang S.J., Chen B., Cheng Y.Y. // Materials Characterization. – 2018. – Vol. 144. – Pp. 316–324. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.07.024.

11. Уравнение индентирования / С. А. Фирстов, Н.А. Мамека, В.Ф. Горбань, Э. П. Печковский // Доповіді Національної академії наук України. – 2007. – № 12. – С. 100–106.

Reference

1. Jörg Kumpfert (2001). Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide. *Advanced Engineering Materials. 11*(3), 851–864. https://doi.org/10.1002/1527-2648(200111)3:11%3C851::AID-ADEM851%3E3.0.CO;2-G.

2. Alan Partridge, & Edward F.J. Shelton. (2001). Processing and mechanical property studies of orthorhombic titanium-aluminide-based alloys. *Air & Space Europe*, 3–4(3), 170–173. https://doi.org/10.1016/S1290-0958(01)90085-1.

3. Barabash, O.M., & Koval, Yu.N. (1986). *Struktura i svoystva metallov i splavov [Structure and Properties of Metals and Alloys]*. Naukova Dumka.

4. Bingqing Chen, Huaping Xiongn, Bingbing Sun, Siyi Tang, Borui Du, & Neng Li (2014). Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints arc welded with Ti–Nb and Ti–Ni–Nb filler alloys. *Progress in Natural Science: Materials International*, *4*(24), 313–320. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.06.003.

5. Bingqing Chen, Huaping Xiong, Bingbing Sun, Siyi Tang, Shaoqing Guo, & Xuejun Zhang (2014). Microstructure Evolution and Tensile Properties of Ti3Al/Ni-based Superalloy Welded Joint. *Journal of Materials Science & Technology*, *7*(30), 715–721. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.06.004.

6. Xiao-Long Cai, Da-Qian Sun, Hong-Mei Li, Hong-Ling Guo, Yan Zhang, & Ying-ying Che (2018). Laser Joining of Ti3Al-Based Alloy to Ni-Based Superalloy using a Titanium Interlayer. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *19*, 1163–1169. https://doi.org/10.1007/s12541-018-0137-5.

7. Ren, H.S., Wu, X., Chen, B., Xiong, H.P., & Cheng, Y.Y. (2017). Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints diffusion bonded with Ni and TiNiNb foils. *Welding in the World March*, *61*(2), 375–381.

8. Haishui Ren, Xinyu Ren, Weimin Long, Bo Chen, Shujie Pang, & Huaping Xiong (2021). Formation mechanism of interfacial microstructures and mechanical properties of Ti2AlNb/Ni-based superalloy joints brazed with NiCrFeSiB filler metal. *Progress in Natural Science: Materials International*, *2*(31), 310–318. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.12.009.

9. Ren, H.S., Xiong, H.P., Long, W.M., Chen, B., Shen, Y.X., & Pang, S.J. (2019). Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints brazed with AuNi filler metal. *Journal of Materials Science & Technology*, 9(35), 2070–2078. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.04.015.

10. Ren, H.S., Xiong, H.P., Long, W.M., Shen, Y.X., Pang, S.J., Chen, B., & Cheng, Y.Y. (2018). Interfacial diffusion reactions and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints brazed with AgCuPd filler metal. *Materials Characterization*, *144*, 316–324. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.07.024.

11. Firstov, S.A., Mameka, N.A., Gorban, V.F., & Pechkovsky, E.P. (2007). Uravnenie indentirovaniia [Equation of indentation]. *Dopovidi Nats. Akademii Nauk Ukrainy*, (12), 100-106.

Отримано 20.08.2022

UDC 621.791

Lidiia Petrushynets[1], Oleh Novomlynets [2], Iurii Falchenko[3], Tetyana Melnychenko[4], Leonid Radchenko[5]

[1]PhD in Technical Sciences, Senior Researcher
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: petrushynets@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7946-3056
ResearcherID: G-2891-2016. **Scopus Author ID:** 55521777800

[2]Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Rector
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: oon1@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0774-434X
ResearcherID: F-8166-2014. **Scopus Author ID:** 56938958300

[3]Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: falchenko@paton.kiev.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-3028-2964
ResearcherID: W-2793-2017. **Scopus Author ID:** 7801687476

[4]Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: melnychenko21@ukr.net. **Scopus Author ID:** 12802654100

[5]engineer, Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: rleonid190@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-4235-2413

STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING NICKEL-BASED INTERMEDIATE LAYERS WHEN WELDING TITANIUM ORTHOALUMINIDE WITH A NICKEL ALLOY

Titanium aluminides have a low density and maintain high strength at elevated temperatures, which makes them promising for the manufacture of aircraft engine elements. In the presented work, the problem of welding in the solid phase orthorhombic titanium aluminide based on the intermetallic compound Ti_2AlNb and heat-resistant alloy ЭИ437Б on a nickel base is considered. A review of the state of the problem of welding heat-resistant alloy ЭИ437Б based on nickel and titanium orthoaluminide Ti_2AlNb was carried out. It was established that the main problem in welding Ti_2AlNb alloy with nickel alloy is a strong tendency to the formation of brittle phases in the joint zone, which negatively affect the mechanical properties. A promising method of joining this group of alloys is diffusion welding in a vacuum.

The purpose of the work is to study the influence of multilayer and gradient foil on the formation of the zone of titanium orthoaluminide joints with a nickel-based alloy during vacuum diffusion welding.

In the work, multilayer and gradient foil based on Al-Ni and Ni-Ti systems were used according to the original structure. The foils were obtained by electron beam evaporation and condensation in a vacuum. The deposition process consists in the layer-by-layer condensation of elements on a horizontal substrate.

The work presents the method of conducting experiments, welding modes, chemical composition of materials and foil.

The work shows for the first time that during the direct welding of titanium orthoaluminide with the ЭИ437Б alloy, as a result of the strong tendency of the materials to form brittle phases at the joint, a significant increase in microhardness is observed in the joint zone up to 2...4 times compared to the base material (up to 11.94 GPa). It was established that the use of layered foil (Ni/Ti, Al/Ni) as intermediate layers allows to significantly reduce the difference in microhardness values in the joint. At the same time, the microhardness in the central part of the joint zone reaches 6.69...8.79 GPa, which is close to the microhardness values of Ti_2AlNb.

The presented materials can be used as a basis for the development of welding technologies in the solid phase of heterogeneous titanium orthoaluminide materials with nickel-based alloys.

Key words: *titanium orthoaluminide; nickel alloy; layered foil; intermediate layer; diffusion welding in vacuum; microstructure; microhardness.*

Table: 2. Fig.: 12. References: 11.

Петрушинець Л., Новомлинець О., Фальченко Ю., Мельниченко Т., Радченко Л. Дослідження можливості використання проміжних прошарків на основі нікелю при зварюванні ортоалюмініду титану з нікелевим сплавом. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 38-51.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-52-56
УДК 621.865.6

Анастасія Бєляєва[1], Ірина Верба[2], Олександр Даниленко[3]

[1]кандидат технічних наук, доцент кафедри «Конструювання машин»
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: an_bel1212@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-1696-8687

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри «Конструювання машин»
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: verba.dan@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1891-7215

[3]кандидат технічних наук, доцент кафедри «Конструювання машин»
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: alednlnk@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-6585-7724

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ЛІФТА-ПІДЙОМНИКА ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ОСОБЛИВИМИ ПОТРЕБАМИ ТА ЙОГО БАЧЕННЯ В МАЙБУТНЬОМУ

Стаття є описовою та присвячена аналізу запропонованого ліфта-підйомника та баченню його у майбутньому для людей з обмеженими можливостями. Задача цієї статті запропонувати бачення конструктивних змін ліфта-підйомника з кріслом-трансформером, що зміг би допомогти літній людині або молодій людині з особливими потребами чи з проблемами опорно-рухомої системи переміщатися у просторі без болю та допомоги інших осіб. Розглянуті види підйомників, інші варіанти аналогічних виробів. Визначено напрямок подальших досліджень.

Ключові слова: *ліфт-підйомник, крісло-трансформер, актуатор, люди з особливими потребами, опорно- рухомий апарат, біль.*

Рис.: 2. Бібл.: 5.

Актуальність теми дослідження. Як у всьому світі, так і в нашій країні на різних рівнях завжди існували проблеми із забезпеченням людей з особливими потребами комфортного та безболісного переміщення, зміни положення тіла та інше. Особливо ця проблема відчувається в нашій країні. Не завжди у людини є можливість знайти того, хто б допомагав пересуватися по квартирі, змінювати положення тіла. Для цього необхідний пристрій, яким би людина з особливими потребами мала б змогу користуватися без чиєї-небудь допомоги. Стаття є оглядовою.

Постанова задачі. Проаналізувати існуючий ліфт-підйомник для осіб з обмеженими можливостями та запропонувати бачення розширення функцій уже наявного ліфта-підйомника в майбутньому. І тоді може буде вирішена проблема багатьох людей похилого віку, які страждають різними хворобами суглобів і хребта, і ці хвороби завдають болю при таких рухах, як підйом зі стільця, дивана, ліжка тощо. При цьому мазі, таблетки, всілякі підтримуючі пов'язки та ін. здебільшого трохи полегшують біль, а не прибирають цей біль взагалі [1].

Метою роботи є аналіз ліфта-підйомника для допомоги та забезпечення людей з особливими потребами й бачення розширення його функцій, що допомагало б людині мінімально відчувати біль при зміні положення із сидячого у стояче, а також переміщатися з одного місця в інше, якщо людина не може самостійно пересуватися.

Матеріали та методи. Для забезпечення такої мети необхідно спеціальне обладнання для транспортування людини з одного міста до іншого з кріслом-трансформером, за допомогою якого людина без болю або з мінімальним відчуттям болі у спині та суглобах змогла б прийняти вертикальне положення, піднімаючись з крісла.

Бачення цього типу обладнання і буде приділена увага в цій роботі. Далі в роботі розглянуто деякі види підйомників.

1. Механічні підйомники для осіб з інвалідністю. Це найпростіший варіант підйомних пристроїв, який має ручне управління. Для початку руху потрібно вплив людини, яка супроводжує, що є головним мінусом. Навіть такий підйомник дешево не купити, якщо це не простий механізм для переміщення у ванну.

© Бєляєва А. Ю., Верба І. І., Даниленко О. В., 2022

2. Електропідйомник для осіб з інвалідністю. Висока швидкість переміщення, велика вантажопідйомність і висота – плюси електричного привода. Конструкція робить транспортування лише особи з інвалідністю, тому застосовується в приміщеннях (зняти людину з ліжка, доставити у ванну тощо.)

3. Підйомник з гідравлічним приводом. Головна перевага моделей такого типу – плавний хід. Переважно вони застосовуються для громадського транспорту, переміщення пацієнта в оздоровчому закладі у ванну і т. ін. Крісло не рухають. Серед підйомників російського виробництва уваги заслуговує СН-41.00 (Мед-Сердце).

4. Вертикалізатори. Наприклад, вертикалізатор StrapStand [2], обладнаний оригінальною системою ременя-фіксатора і приводом, що забезпечує вертикальне положення користувача прямо з коляски. Вертикалізатор StrapStand простий у використанні, не створює ніяких труднощів для користувача під час транспортування. Зручно спроєктовані ручки підйому знижують навантаження на колінні суглоби.

Також було вивчено крісло-реклайнер [3]. Воно є багатофункціональним видом меблів, який можна використовувати як мінідиван для відпочинку. Крім того, крісло-реклайнер забезпечено м'якою підставкою для ніг, що висувається. Завдяки функції підйому можна підняти і нахилити сидіння вперед так, щоб встати з крісла було зручніше і легше. Шкіряні реклайнери забезпечені багатошаровими подушками, які забезпечують комфортний відпочинок. Також крісла з таким механізмом досить часто забезпечені дистанційним пультом управління і вібраційним механізмом. Підйомне крісло-реклайнер, крім домашнього застосування, часто використовується в професійних медичних, масажних і косметичних салонах [3].

Крісло-реклайнер з відкидною спинкою допоможе ефективно зняти стрес і втому. Універсальна конструкція такого крісла для відпочинку дозволяє мінімізувати навантаження на поперек. При цьому підтримується правильна постава і розслабляються м'язи всього тіла. Реклайнер допомагає знижувати навантаження на стегна, а підголівник прибирає навантаження з шиї. Таке підйомне крісло особливо необхідно для людей, у яких є проблеми з хребтом. Підйомне крісло також допомагає без особливих зусиль стати людині з обмеженими можливостями на ходунки. Ця особливість крісла знадобиться людям похилого віку або тим, хто переніс серйозну травму [3].

Є три види регулювання - механічне, електроприводне й сенсорне.

Механічне управління має на увазі застосування фізичних зусиль: для того щоб спинка крісла опустилася, на неї необхідно натиснути власною вагою, а для повернення у вихідне положення необхідно потягнути за важіль.

При електричному управлінні даним кріслом потрібно лише скористатися дистанційним пультом керування. Також, натиснувши на нього, людина може вибрати будь-яке необхідне положення крісла.

Крісло-реклайнер з сенсорним керуванням дозволяє керувати ним за допомогою сенсорної панелі, яка знаходиться на підлокітниках.

Сидіння SPINERGO відрізняються від звичайних крісел спеціально влаштованим рухливим сидінням, яке завдяки спеціальним механізмам рухається вільно в будь-якому напрямку.

Ортопедичні крісла Spinergo поєднують у собі якості фітнес-м'яча та комфортабельного крісла, тим самим покращуючи якість здорового сидіння. Рух при сидінні запобігає болям у спині та підтримує здорову поставу. Ергономічне крісло відрізняється від звичайних крісел, спеціально влаштованим рухливим сидінням знизу, яке завдяки спеціальним механізмам рухається вільно в будь-якому напрямку .

Ортопедичні крісла Spinergo дають можливість відчуття статики й одночасно динаміки при сидінні, зміцнюють м'язи спини, підтримують здорову осанку при довготривалому сидінні та запобігають болям у спині.

У кріслах із фіксованим сидінням вага тіла зосереджується в поперековій зоні, тобто це викликає біль та неприємні відчуття в крижах.

Після проведення аналізу наявних конструкцій, будемо прагнути до таких вихідних даних ліфта-підйомника для людей з обмеженими можливостями, а саме:

1. Вантажопідйомність: 1500 кг.
2. Зріст людини 150-190 см.
3. Мінімальна висота підйому 450 мм
4. Максимальний хід: 1000 мм.
5. Привод – актуатор.
6. Поворотні на 360 градусів всі чотири колеса зі стояночними гальмами на задніх колесах.
6. Ремінь безпеки триточковий.
7. Легкосплавний коробчастий профіль (дюраль-алюмінієвий сплав).
8. Розкладання крісла у вертикальне положення на 180 градусів.
9. Пульт дистанційного керування.

У вихідних даних у ролі приводу пропонується актуатор. У цьомуму випадку актуатор буде служити тільки для зміни траєкторії руху самого підйомника.

Актуатори є спеціальними пристроями, головним завданням яких є перенесення зусилля з керуючого або регулюючого механізму на виконавчий. Найчастіше це електромеханічний агрегат, який дозволяє виконувати кругові чи лінійні переміщення. Завдяки цьому можна значно полегшити виконання технологічних операцій, тестування, зокрема спростити умови побуту. Ці пристрої застосовують і для вдосконалення специфічних завдань, наприклад, для здійснення місій та проведення досліджень у космічному просторі [5].

Як найближчий аналога візьмемо конструкцію представлену у [4]. На рис. 1 показаний ліфт-підйомник з кріслом-трансформером, баченню якого присвячена ця стаття.

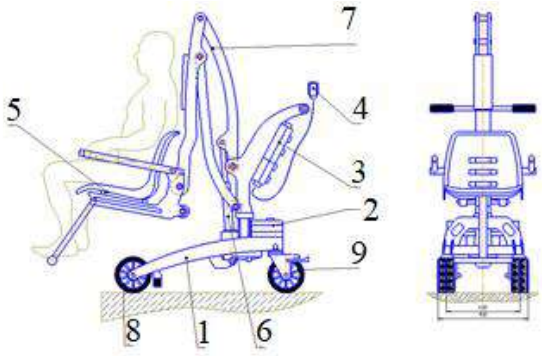


Рис. 1. Ліфт-підйомник з кріслом-трансформером для людей з обмеженими можливостями: 1 – рама опірна; 2 – противаги; 3 – блок керування з батареями; 4 – пульт керування; 5 – сидіння; 6 – актуатор; 7 – рама підйомна; 8 – колеса передні; 9 – колеса задні з гальмами

Метою конструкції [4] є реабілітація людей з обмеженими можливостями для лікування за допомогою водотерапії. Вона включає в себе різноманітні вправи в басейнах. Для забезпечення такої мети необхідно спеціальне обладнання для транспортування людини до басейну та безпечного і плавного опускання-піднімання її.

Результати. Для того щоб характеристики підйомника повністю влаштовували виконанню умов вихідних даних, необхідно буде замінити траєкторію руху руки цієї конструкції за допомогою заміни привода піднімання-опускання на комплектний електропривод (актуатор).

Керування виробом, взагалі, буде можливим за допомогою модернізованого пульта керування однією людиною, за умови, що виріб буде стійким та надійним.

Конструкція буде також мати додаткові опори для більшої стійкості, поручні, регульований підголівник, руків'я для забезпечення транспортування пацієнта, чотири обертальні колеса відповідної вантажопідйомності, два з яких матимуть стояночні гальма, крісло-трансформер з регульованими глибиною сидіння, висотою спинки та підніжжя для людей різного зросту.

Конструкцію рами передбачається виконати з легкосплавних корозійностійких матеріалів (алюміній, титан).

Перевагами даної конструкції будуть:

- наявність пульта дистанційного керування;
- легкість піднімання і переміщення пацієнта;
- вигнута та жорстка багатоланкова конструкція підйомного механізму, що дозволить асистенту чи самій людині здійснювати усі процедури максимально швидко та безпечно.

Принцип дії актуатора (рис. 2) [5]. У більшій частині випадків використовується двигун, який передає рух штоку. Шток висувається або втягується, переміщаючись по напрямній. Лінійні актуатори для забезпечення лінійного переміщення в більшості випадків застосовують гвинт, тобто так звану гвинтову передачу. Завдяки обертанню гвинта відносно гайки або навпаки забезпечується лінійне переміщення штока.

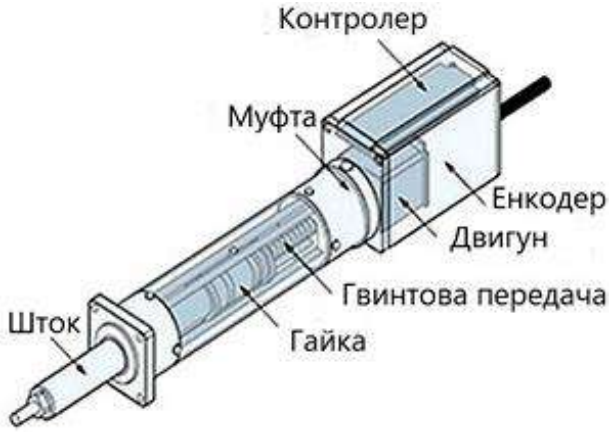


Рис. 2. Актуатор [5]

Двигуни, що застосовуються в лінійних актуаторах, найчастіше являють собою стандартні колекторні пристрої, що працюють на постійному струмі в 12 або 24 В. Більш потужним агрегатам потрібно електрострум значно більшого значення. Однак можливе застосування й інших типів двигунів.

Для зміни напрямку руху штока слід поміняти напрям обертання двигуна. Для прикладу, в колекторному двигуні слід змінити полярність електроживлення. З цією метою в конструкцію додається перемикач. Завдяки йому відбувається зміна полярності електроживлення. У результаті простим натисканням кнопки можна змінити обертання двигуна, а значить поперемінно змінювати напрям переміщення шток (висування або втягування).

Висновок. Ліфт – підйомник, що є найближчим аналогом наведеному в патенті [4], може тільки перевозити людину з проблемами опорно-рухомої системи та опускати їх в басейн. Але перетворивши його, як показано на рис. 1, можна зробити його корисним і для інших робіт, наприклад для допомоги людям з проблемами опорно-рухової системи приймати вертикальне положення з сидячого та інше. А також полегшити конструкцію та зробити її більш стійкою та дистанційно керованою.

Список використаних джерел

1. Bieliyaieva A. Yu. Lift for people with speciale needs with a chair transformer / A. Yu. Bieliyaieva, A. S. Popok //Materials of the XVII international scientific and practical Conference Modern European. – 2021. – June 30 - July 7, 2021. – Pp. 100-101.

2. Standing mobility and/or transfer device : patent 13/442377 United States : A61G7/10. No. 06/14/2016 ; applied on 09.04.2012 ; published on 14.06.2016.
3. ROCKER/RECLINER CHAIR : patent 884,187 United States : A47C1/034; A47C1/0355; A47C3/027; A47C3/029; (IPC1-7): A47C1/035. No. 04/884187 ; applied on 11.12.1969; published on 23.11.1971.
4. Standing mobility and/or transfer device: patent 13/442377 United States : A61G7/10. No. 06/14/2016 ; applied on 09.04.2012 ; published on 14.06.2016.
5. Электросам.ру [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/aktuatory.

References

1. Bieliyaieva, A.Yu., Popok, A.S. (2021). Lift for people with speciale needs with a chair transformer. *Materials of the XVII international scientific and practical Conference Modern European – 2021* (pp. 100-101).
2. Standing mobility and/or transfer device : patent 13/442377 United States : A61G7/10. No. 06/14/2016 ; applied on 09.04.2012 ; published on 14.06.2016.
3. ROCKER/RECLINER CHAIR : patent 884,187 United States : A47C1/034; A47C1/0355; A47C3/027; A47C3/029; (IPC1-7): A47C1/035. No. 04/884187 ; applied on 11.12.1969; published on 23.11.1971.
4. Standing mobility and/or transfer device : patent 13/442377 United States : A61G7/10. No. 06/14/2016 ; applied on 09.04.2012 ; published on 14.06.2016.
5. Elektrosam.ru. https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/aktuatory.

Отримано 23.05.2022

UDC 621.865.6

Anastasia Bieliaieva[1], Iryna Verba[2], Oleksandr Danylenko[3]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Machine Design»
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: an_bel1212@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-1696-8687

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Machine Design»
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: verba.dan@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1891-7215

[3]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Machine Design»
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: alednlnk@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-6585-7724

ANALYSIS OF THE ELEVATOR DESIGN FOR PEOPLE WITH SPECIAL NEEDS AND ITS VISION IN THE FUTURE

The object of the study is a lift for people with special needs. The article is an overview and is devoted to the review of the construction of a lift for people with special needs, namely people who cannot stand up and/or move independently or people who have problems with the musculoskeletal system and vision for changing its functionality. It is assumed that the lift proposed in this article will be equipped with a transforming chair and a remote control. Such a lift will help both people with special needs themselves and those around them who are forced to help with similar lifts. To do this, at the beginning of the article, different types of lifts are considered with all the characteristics, where the shortcomings of a particular device are clearly visible. Also selected lift, which is improving. The lift, chosen as the closest analogue, is intended for treatment with hydrotherapy. Therefore, it is suitable for moving a person from one point to another and letting down a person into the pool. However, this lift also has disadvantages, such as: a need of a person who will operate the lift; absence of a mechanism to help people get upright from sitting, because in this case there is no such need. Further, a device that changes the trajectory of the movement of the very arm of this lift, followed by an explanation of its operation is proposed. And the main goal is to develop a transforming chair, taking into account the height and weight of a person, as well as easy control and paying great attention to the safety of such a lift with a transforming chair, namely its stability and insurance of the person sitting in the chair of such a lift when the patient's position changes. A remote control will also be offered with large buttons, voice and simple controls for easy self-use by a person with special needs, allowing it to be used by a wider range of patients.

***Key words**: lift, transforming chair; actuator; people with special needs; musculoskeletal system; pain.*
Fig.: 2. References: 5.

Бєляєва А., Верба І., Даниленко О. Аналіз конструкції ліфта-підйомника для людей з особливими потребами та його бачення в майбутньому. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 52-56.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-57-68
УДК 621.9.04

Ірина Верба[1], Олександр Даниленко[2], Назар Порхун[3]

[1]кандидат технічних наук, доцент кафедри Конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: verba.dan@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1891-7215. **ResearcherID:** ABM-1532-2022

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри Конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: alednlnk@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6585-7724. **ResearcherID:** ABN-8993-2022

[3]бакалавр за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»
освітньої програми «Технології комп'ютерного конструювання верстатів, роботів та машин»
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: nazar.porhyn.07@gmail.com

ЯК ОБРАТИ ВІБРАЦІЙНІ ОПОРИ ДЛЯ ВЕРСТАТА? ПИТАННЯ БЕЗ ВІДПОВІДІ

Стаття є публікацією науково-методичного характеру, що висвітлює дослідження вібраційних опор, на яких може бути безпосередньо встановлено верстат. Наведені деякі рекомендації щодо обґрунтування вибору опор і підтвердження відповідності можуть стати у пригоді інженерно-технічним працівникам машинобудівних підприємств і конструкторам. Відзначено, що в інформаційних джерелах практично відсутня оновлена інформація з цього питання. Найліпший варіант – це обґрунтована експериментально рекомендація заводу-виробника щодо придатності обраних опор, але може застосовуватись для нових верстатів. Такий шлях не придатний, наприклад, у разі модернізації чи змінюванні умов експлуатації. Стаття є публікацією науково-методичного характеру.

Ключові слова: *віброопора; віброізоляція; передача коливань; фундамент верстата; пружні матеріали.*
Рис.: 4. Бібл.: 14.

У статті представлено результати науково-методичного дослідження задачі встановлення верстатів та іншого обладнання безпосередньо на вібраційних опорах та деякі рекомендації щодо обґрунтування вибору цих опор і підтвердження їхньої придатності.

Актуальність теми дослідження. Стаття призначена для інженерно-технічних працівників машинобудівних підприємств, конструкторів, які займаються модернізацією наявного обладнання, насамперед на невеликих підприємствах. Результати дослідження можуть бути застосовані саме на підприємстві, оскільки розв'язок задачі не повинен передбачати складних динамічних досліджень і розрахунків, які потребують відповідних фахівців та обладнання.

Постановка проблеми. При експлуатації верстатів обов'язково постає задача забезпечення точності обробки, зокрема й за рахунок встановлення верстатів відповідним чином та їхньої ізоляції від вібрацій активних (що виникають у вузлах верстата і поширюється на навколишні предмети) та пасивних (надходять ззовні). Проблема полягає в тому, що для обґрунтованого вибору опор треба застосувати складні динамічні дослідження верстата (теоретичні або експериментальні), що не завжди можливо та й недоречно в багатьох випадках, наприклад, коли це стосується модернізації обладнання в умовах невеликих підприємств: переважно немає ні спеціалістів потрібного наукового рівня, ні відповідного обладнання. Застосовують різні способи встановлення обробного обладнання. Існує значна кількість фірм, що випускають вібраційні опори знову ж таки різних типів і ніде в їхніх характеристиках немає конкретної інформації, у яких випадках вони придатні: лише загальні фрази рекламного характеру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій не дає відповіді на поставлене запитання. Є низка наукових статей, які містять цікаву інформацію, розширюють наші уявлення про процеси, що відбуваються при експлуатації верстатів, особливо прецизійних, але практичних рекомендацій щодо вибору опор у них немає. Щось можна знайти у літературних

© Верба І. І., Даниленко О. В., Порхун Н. Ф., 2022

джерелах 40-річної давності [1; 2; 3; 4], але ж вимоги до верстатів та показників їхньої працездатності за цей час змінились значним чином. Змінились і використовувані опори, принаймні що стосується пружних матеріалів. Новіші інформаційні джерела [5; 6; 7] практично повторюють названу інформацію за незначних змін.

Метою статті є інформаційно-аналітичний огляд варіантів безфундаментного встановлення верстатів, конструкцій, принципу дії, порівняльних характеристик пружних віброопор різних типів, які встановлюються безпосередньо під станиною, і рекомендацій щодо визначення придатності опор, хоча б і орієнтовно, а також констатація наявної проблеми вибору й порівняльного оцінювання пружних віброопор.

Виклад основного матеріалу. Традиційне уявлення про верстати: цех (окреме приміщення, 1-й поверх), розташування згідно з ділянками за призначенням (токарні, фрезерні тощо), окремі верстати стоять на бетонних фундаментах або утворюють автоматичну лінію, тобто розташовані згідно з технологічним процесом, що його реалізують, і встановлені знову ж таки на фундаментах (в усякому разі – переважно). Наразі змінилось виробництво й підходи до його організації. Як мінімум:

– застосовують гнучкі оброблювальні центри з високою концентрацією операцій або багатоцільові верстати;

– є можливість групувати верстати за потребою та забезпечувати автоматизацію виробничого процесу (не лише конвеєрна лінія, а, наприклад, промислові роботи).

Звісно, всі зміни зумовлені насамперед потребами користувачів верстатів, а вони, своєю чергою, ринковими вимогами, тобто тим, що бажає споживач. Нічого нового й несподіваного у вищезазначеному немає. Але подивимось на ці вимоги з погляду експлуатації верстатів. Традиційні вимоги до верстатів – продуктивність та точність (тривале її збереження), нещодавні – гнучкість, яка навіть превалює над продуктивністю. І всі ці вимоги так чи інакше пов’язані зі встановленням верстатів у цеху.

Вимоги до точності та до якості поверхні оброблюваних деталей зумовлюють жорсткіші, ніж для інших машин, вимоги до точності взаємного розташування та переміщення вузлів верстата та менший рівень припустимих пружних переміщень і амплітуд коливань, а отже, визначають спосіб встановлення верстата. На верстат діють статичні навантаження (вага вузлів верстата, сили різання) та динамічні (сили інерції, сили, які виникають у працюючому приводі, удари в зазорах тощо). Діють також зовнішні навантаження, наприклад, осадка верстата або коливання основи, які можуть викликати деформації несучої системи та, відповідно, її коливання. Тож верстати самі є джерелами коливань, а в певних випадках вони чутливі до коливань від зовнішніх джерел, зокрема, зумовлених цеховим устаткуванням (зокрема силовими установками, обладнанням, яке експлуатується поряд, навіть системою вентиляції чи подачі робочих рідин, які також генерують коливання різної частоти).

Обладнання, яке нормально функціонує, завжди має певний рівень вібрацій. Наприклад, для фрезерних верстатів це 3-7 мкм. Якщо верстат має амплітуду коливань більшу за 20 мкм, то це може свідчити про те, що він вийшов із ладу [5].

Якість віброізоляції верстата саме і визначається закономірностями передачі коливань від станини верстата до зони різання і характеризується коефіцієнтом γ передачі коливань.

Коливання станини відбуваються зазвичай на низьких частотах (за винятком жорсткої установки, коли вони збігаються з коливаннями підлоги). Вони є збуджуючим фактором для вузлів верстата, які несуть інструмент і заготівлю, тобто для шпиндельного вузла та супорту або столу. Відносні коливання інструменту і заготівлі, що впливають на точність і якість оброблюваної поверхні, відбуваються саме на верхніх частотах, що визначаються власними частотами тих вузлів верстата, які задіяні у формоутворенні, тобто несуть інструмент і заготівлю.

Чутливість верстата до коливань основи (тобто до коливань фундаменту чи віброопор, які встановлено безпосередньо під станиною або в поєднанні зі спрощеним елементом фундаменту) визначається конструкцією верстата та параметрами вузлів, розташованих на станині. Чим нижчі власні частоти цих вузлів, тим вище чутливість верстатів до коливань основи, тим вищий рівень віброізоляції потрібний.

Середній рівень коливань основ, типовий для механічних цехів машинобудівних підприємств, умовно можна охарактеризувати середніми амплітудами регулярних коливань основи приблизно 2,5-3 мкм на частотах до 20-25 Гц, що зменшуються на більш високих частотах, та максимальними амплітудами імпульсних збурень близько 10-12 мкм у зоні власних частот основ до 40 Гц, які відповідають найпоширенішим видам верстатів [6].

Для верстатів, що працюють в умовах середнього рівня коливань основи, параметри віброізоляції орієнтовно можна обирати так, щоб найвища частота власних коливань верстата на опорах була в 3-4 рази нижчою за найнижчу із власних частот формоутворюючих вузлів верстата (так званих верхніх вузлів – шпиндельна бабка, стіл, супорт, колона, шліфувальні головки, траверса зі шпиндельною головкою тощо). Орієнтовні значення власних частот коливань верхніх вузлів верстатів середніх розмірів наведено в інформаційних джерелах [1; 2; 5], а методика експериментального визначення цих частот – у [1].

Нижня власна частота обробної системи практично не впливає на верхні власні частоти системи. За даними експериментальних досліджень, наявними в інформаційних джерелах [1; 2; 5], найнижчі з цих верхніх частот для токарних верстатів становлять 60...10 Гц, для плоскошліфувальних – від 30 Гц (при напрямних кочення) до 60 Гц тощо. Чим більша різниця між частотами цих коливань та коливань станини, тим менше амплітуди їх відносних коливань.

Наведені дані дають загальне враження про вібраційну ситуацію при встановленні верстата.

Один із традиційних шляхів послаблення коливань – встановлення верстата на фундамент, який повинен мати таку частоту власних коливань, яка перевищує більш ніж на 40 % частоту f_0 власних коливань верстата, що для цього класу верстатів становить 10…25 Гц [1; 5]. При цьому масу фундаменту приймають у 2 рази більшою, ніж маса верстата, і розглядають їх як одне ціле. У певних випадках масу фундаменту визначають розрахунком з умови зменшення амплітуди відносних коливань, наприклад, у 3 рази. До цього треба додати, що фундамент забезпечує стале розташування верстата без можливості його змінювати і не гарантує максимального демпфування вібрацій працюючого поряд обладнання.

З певного часу технологічне обладнання, насамперед таке, що може мати динамічний вплив на навколишнє обладнання чи довкілля, а також високоточні верстати й такі, що чутливі до коливань станин, почали встановлювати на пружні віброізолюючі опори. Це стосується також до верстатів загального призначення та таких, які встановлено на перекриттях верхніх поверхів споруд (єдині опори, що це припускають) чи за потреби комплектації верстатів згідно з технологічним процесом із можливістю зміни.

Віброізлюючі опори не потребують технічного обслуговування протягом усього терміну експлуатації, зберігають стабільність конструкції незалежно від джерела хвильових коливань і є найдешевшим варіантом віброізоляції.

Для верстатів, які мають частоту власних коливань на опорах $f_Z > 10$ Гц, передусім оцінюється можливість віброізоляції за встановлення пружних віброопор безпосередньо під станиною: залежить не лише від очікуваного рівня коливань від внутрішніх джерел збудження, а також від жорсткості станини, яку характеризують показником l / h (l – довжина станини, h – висота перерізу станини) та очікуваного кута нахилу, який зумовлено дією ваги рухомих вузлів.

Не потребують віброізоляції верстати, призначені для обробки деталей із шорсткістю *Ra* = 2,5 за умови порівняно грубих допусків (порядку 10-20 мкм) на похибки форми виробу. Також не потребують захисту від коливань основи верстати з процесом різання з ударами (фрезерні, довбальні, стругальні тощо), бо й так мають значні амплітуди відносних коливань.

Технічні характеристики віброізолюючих опор визначаються як конструктивними особливостями, так і застосованими матеріалами. Використовують цільнометалеві, гумові, гумометалеві опори.

Встановлення металевих елементів покращує експлуатаційні характеристики гумових опор, зокрема, дозволяє збільшити максимальне навантаження, а також частково виконує захисні функції. Суттєва перевага – регульована висота.

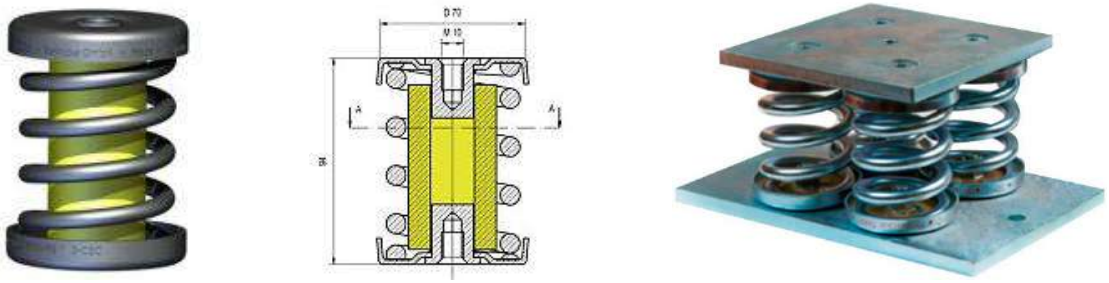
Цільнометалеві опори здійснюють гасіння коливань при значній масі верстата: припускають значні деформації без втрати експлуатаційних якостей. Недоліком є передача високочастотних коливань, що є обмеженням сфери застосування.

Гумові опори або опори з інших пружних матеріалів, зокрема, пружних елементів типу килимків та прокладок, у разі застосування для віброізоляції дають можливість забезпечувати різні власні частоти f_0 вертикальних коливань верстата. Наприклад, для гумових та гумометалевих опор, у яких гума працює на стиск, це ті самі 25 Гц $\geq f_0 \geq$ 10 Гц, але без вартісного й досить тривалого за часом виготовлення спеціального фундаменту.

Найменшого поширення, в усякому разі для встановлення обробного обладнання, набули опори з фетру та пробки та свинцево-азбестові, бо не забезпечують значного усунення коливань.

Зупинимось докладніше на віброопорах, які можуть бути застосовані у верстатах.

На рис. 1 показано пружинні віброізолятори Vibrofix Spring. Їхню пружну дію можна посилити за рахунок додаткових пружних елементів (наприклад, вставкою з еластичного, стійкого поліуретанового еластоміру Sylomer HD усередині – рис. 1, *а*) та використанням пластин (килимків) з пружного матеріалу або тим, що за допомогою спеціальних опорних пластин кілька пружин можна змонтувати на спільній плиті (рис. 1, *б*).



а *б*

Рис. 1. Антивібраційні пружинні опори Vibrofix Spring [8]

Пружинні віброопори є здебільшого низькочастотними: для спіральних або листових сталевих пружин – $f_0 \leq 5$ Гц. Наприклад, опори модельного ряду Isotop (компанія Reinicke GmbH, Німеччина) мають резонансну частоту близько 3,2 Гц = 192 хв$^{-1}$. Експериментальні дослідження, результати яких є у інформаційних джерелах, показали, що пружинні віброопори можуть бути рекомендовані при частоті обертання агрегатів, яка не перевищує 1800 хв$^{-1}$, а для встановлення верстатів найдоцільнішими є гумовометалеві опори.

На рис. 2 показано віброопору ОВ-31, яка є розповсюдженою для верстатів, бо забезпечує захист в осьовому й поздовжньому напрямках. Відноситься до так званих рівночастотних пристроїв: частота власних коливань верстата на таких опорах мало залежить від навантаження на них. Є складеною конструкцією, що має комбіновану основу з гумометалевого елемента та поєднує амортизаційні властивості гуми (принцип дії ґрунтується на стисканні) з міцністю металу корпусу, що забезпечує захист від зовнішніх впливів.

Віброізолюючі опори типу ОВ-31 призначені для встановлення верстатів з жорсткими станинами (тобто таких, для яких $l / h = 4 \div 5$, де l – довжина станини, h – висота перерізу станини) вагою до 10-15 т [6]. До таких верстатів належать токарні, шліфувальні, координатно- та алмазно-розточувальні верстати тощо.

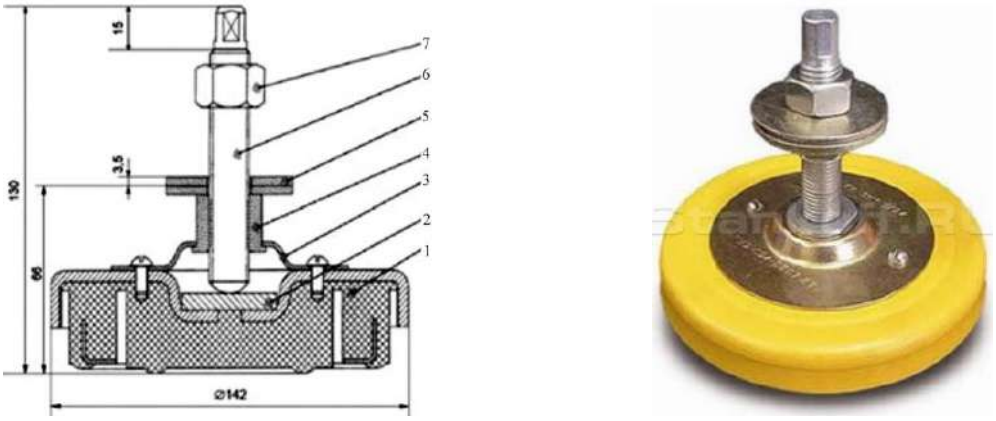


Рис. 2. Віброізолююча опора ОВ-31. Складові (знизу вгору) [6]:
1 – гумометалевий елемент; 2 – підкладка; 3 – кришка; 4 – гайка М16;
5 – шайба (2 шт.); 6 – гвинт М16; 7 – гайка регулююча М16

Основні функції:

• захист від вібрацій: активних, пасивних, стаціонарних та випадкових, демпфування коливань, зниження їхньої амплітуди;

• забезпечення точного горизонтального рівня та оптимальної висоти верстата під час встановлення.

Особливості:

• низькорезонансні, не припускають великих амплітуд зміщень станини;

• частота власних коливань верстата на таких опорах мало залежить від навантаження на них (є опорами з рівночастотною характеристикою);

• жорсткість цих опор є нелінійною і приблизно пропорційна навантаженню від ваги обладнання (в опорах з лінійною характеристикою жорсткості переміщення важкого вузла верстата або змінювання ваги оброблюваної деталі зумовлюють змінювання розподілу навантаження на опори, що своєю чергою впливає на вертикальні й горизонтальні коливання верстата);

Основні технічні характеристики опор типу ОВ-31:

– діапазон робочих навантажень на одну опору (250-4500 кг);

– діапазон регулювання за довжиною гвинта 15 + 2 мм;

– власна частота вертикальних коливань ~ 20 Гц (при навантаженні на опору 2…5 кН), а в разі підвищених вимог до віброізоляції – 15 Гц;

– логарифмічний декремент коливань опори $\lambda \sim 0{,}6$;

– габаритні розміри (рис. 2 – для опори ОВ-31).

Сучасний варіант подібної опори ОВ-31МП (виробництва, наприклад, GB TRADE [9] є ефективнішим, має певні переваги: мінімальне навантаження, за якого опора працездатна, 5 кг на одну опору (замість 250 кг); передбачено використання сучасного пружного матеріалу – армований композит (на відміну від гуми, не втрачає властивості від контакту з мастилом, не грубішає з часом і не «тече»). Саме матеріалом відрізняються опори різних виробників. Переважно від застосування гуми виробники відмовились. Віброопори мають широкий діапазон температур, за яких вони є придатними [10].

Україна виробляє віброопори ОВ-31М. Вони призначені для середніх та легких верстатів. На 4 опорні точки можливо встановити обладнання масою 1-18 т (разом з оброблюваною деталлю). Якщо маса менша, то віброопора не працює як амортизатор через незадовільну жорсткість. Треба обрати інші опори, які придатні для меншого навантаження (наприклад, опори ОВ-70 придатні для навантаження від 200 кг до 2000 кг/опору). А надто велике навантаження буде витискати пружний елемент в корпус кришки, доки вона не упреться у підлогу. Тож у цьому випадку треба збільшити кількість віброопор. Кількість опорних точок загалом визначається обладнанням (скільки передбачено лап для закріплення, тощо). Але є певні правила, яким треба слідувати при виборі місця розташування додаткових опорних точок.

При встановленні на віброопору ОВ-31М обладнання вагою від 1000 кг до 1400 кг за нерівної поверхні підлоги можливе зміщення обладнання в горизонтальній площині («сповзання» з робочого положення). Щоб запобігти цьому явищу віброопори встановлюють на фіксатори горизонтальних зсувів ФГС-31 (рис. 3), які мають по 2 отвори для закріплення ФГС до підлоги й округлий отвір з бортом для запобігання зміщенню обладнання.

Рис. 3. Фіксатор горизонтальних зсувів ФГС-31 [11]

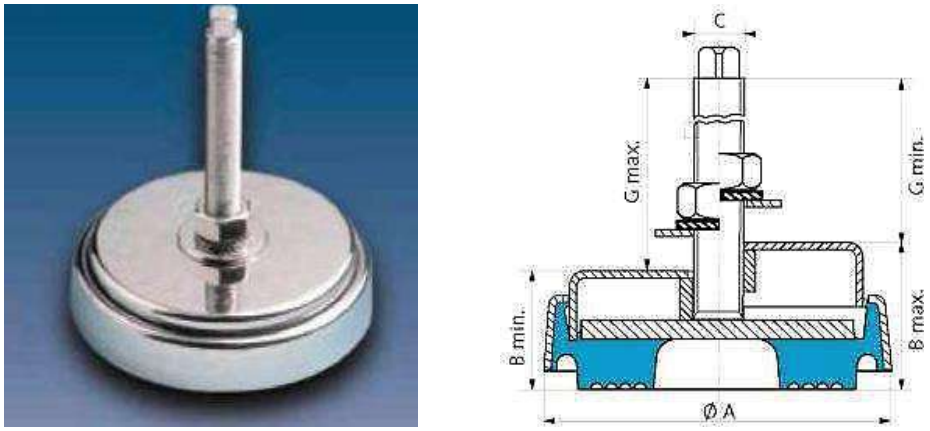


Рис. 4. Віброопора NIVOFIX® [9]

На рис. 4 показано цільнометалеву регульовану віброопору NIVOFIX®, яка складається з диска та еластомірної основи з протиковзними кромками, завдяки чому вона не вимагає кріплення. Віброопора поглинає високочастотні вібрації.

Для коректного вибору певної моделі необхідно враховувати деякі загальні фактори:

– характеристики коливань: періодичність виникнення та частота;

– маса устаткування (з врахуванням маси завантаженого матеріалу). Віброопора має не тільки погасити хвилі, а й витримати вагу верстата без погіршення експлуатаційних якостей;

– загальний напрямок вібрації. Найчастіше виникає потреба у встановленні віброопор безпосередньо під станиною або на основі. У деяких випадках потрібно зменшити коливальні процеси в бічних чи верхніх частинах обладнання [12];

– умови експлуатації: наявність хімічно агресивних речовин, вологи, зниженої температури, які сприяють руйнуванню, наприклад, металевих елементів опори.

Найпростішою була б регламентація способу встановлення верстата заводом, який його випускає.

Рекомендовано [1; 2; 5] тип встановлення верстата (жорстке чи пружне) визначати експериментальним порівняльним оцінюванням на заводі-виробнику. Вимірюють амплітуди вертикальних та горизонтальних абсолютних коливань станини та відносних коливань інструменту й деталі за нормаллю до оброблюваної поверхні. Оцінюють чутливість верстата до коливань станини або основи (за коефіцієнтами γ_z, $\gamma_{x,y}$ передачі цих коливань у зону різання), граничний рівень коливань основи, за якого для даного верстата можливою є віброізоляція пружними опорами. Висновок заводу-виробника щодо можливих способів віброізоляції разом із результатами експериментальних досліджень наводиться в паспорті верстата. Однак умови майбутньої експлуатації верстата в більшості випадків невідомі, не завжди жорстко задані вимоги до точності та рівень динамічних навантажень, які діють у верстаті.

Остаточно спосіб встановлення верстата обирають на місці застосування, але у відповідальних випадках вибір повинен ґрунтуватися на результатах попередніх порівняльних досліджень встановлення верстата на жорстких опорах та гумометалевих, які виконують на заводі-виробнику, та відповідних рекомендаціях.

Для верстатів середніх розмірів (за винятком високоточних), які працюють при середньому рівні коливань, типовому для механічних цехів, спосіб віброізоляції можна обирати на основі аналізу особливостей та умов роботи верстата і простих розрахунків.

Розрахунок віброізоляторів зводиться до визначення їхньої пружності та геометричних параметрів: висоти, площі та числа гумових прокладок або діаметра, чисельності витків та радіусу дроту пружин.

Вихідною передумовою для розрахунку є необхідність забезпечити $\frac{f}{f_0} = 3...4$, де f – частота коливань збуджуючої сили; f_0 – відповідна частота власних коливань верстата на віброопорах.

Це відповідає оптимальній віброізоляції, з погляду значення коефіцієнта передачі коливань від основи в зону різання за різних власних частот коливань верстата на опорах та експлуатаційних характеристик.

Щодо пружинних опор, то в інформаційних джерелах досить докладно розглядають їхній розрахунок, зокрема параметрів самих пружин, у ролі яких можуть застосовуватися також листові ресори, та параметрів гумових елементів. Приклад розрахунку наведено [13; 14].

Інший шлях – обрати покупну віброопору, які широко представлені на ринку від різних виробників, але близькі за технічним рішенням і властивостями. У цьому разі треба обґрунтувати вибір конкретного типу опори та переконатися в її придатності.

Реальні системи мають відносно слабке демпфірування і коефіцієнт передачі виявляє себе переважно на частотах ω_0, наближених до резонансу. Для спрощення розрахунків вважають, що система реагує лише саме на такі частоти, значення яких визначаються

демпфіруванням $\Delta\omega = 0{,}5\,\lambda\times\omega_0$, де λ – логарифмічний декремент коливань [1; 3]. У межах частот $\Delta\omega$ коефіцієнт передачі $K(\omega_0)$ та спектр імпульсу $S(\omega)_{вх}$ (імпульсні коливання основи верстата, які виникають, коли поряд є джерело інтенсивних імпульсних коливань, наприклад, ударне навантаження) вважають постійними.

Ступінь та ефективність віброізоляції оцінюється коефіцієнтами передачі $K_п$ поступальних коливань в напрямі певної осі і K_φ обертових коливань навколо цієї ж осі. У разі гармонічних навантажень формули точні лише в разі, якщо центр мас віброопори співпадає із центром мас обладнання. Ці коефіцієнти можуть бути представлені по-різному і, відповідно, їх використовують для аналізу й отримання додаткової інформації.

Таблиця 1 – Коефіцієнт передачі коливань

№	Рекомендації щодо застосування	Коефіцієнт передачі коливань
1	за дії гармонічних навантажень	$K_{ПZ}=\frac{A_{KZ}}{A_Z}=\frac{1}{\alpha_Z^2}-1;\ K_{\varphi Z}=\frac{M_{KZ}}{M_Z}=\frac{1}{\alpha_{\varphi Z}^2}$ (1)
2	за ефективної віброізоляції	$K_n=\left(\frac{f^2}{f_0^2}-1\right)^{-1}$ (2)
3	без врахуванням коливань станини як складової	$K_п = A_{рі\text{-}заг} / A_{осн}$ (3)
4	з урахуванням коливань станини	$K_n=k_1\cdot\gamma=\frac{A_{ст}}{A_{осн}}\cdot\frac{A_{рі-заг}}{A_{ст}}$ (4)
5	у разі резонансу	$K_п = K_{дин}=\pi/\lambda$ (5)

Використано такі позначення:

$A_{кz}$, $M_{кz}$ –амплітуди гармонічної сили й гармонічного моменту відносно вертикальної осі Z, які передаються через віброопори на опорну конструкцію (якщо вона передбачена);

A_z, M_z. – амплітуди гармонічної сили й гармонічного моменту відносно вертикальної осі Z, які передаються на верстат;

$\alpha_Z = \omega_0 / \omega_Z$, $\alpha_{\varphi Z}= \omega_0 / \omega_{\varphi Z}$ – відношення колової частоти (рад/с) вимушених коливань ω_0 до колової частоти ω_Z власних поступальних (вздовж осі Z) і до колової частоти $\omega_{\varphi Z}$ власних обертальних коливань верстата відносно тієї ж осі. Для кожної з осей колова частота (рад/с) визначається окремо;

f – частота коливань збуджуючої сили, об/хв;

f_0 – відповідна частота власних коливань верстата на віброопорах;

$A_{рі\text{-}заг}$ – амплітуда відносних коливань між інструментом та заготовкою;

$A_{осн}$ – амплітуда коливань основи;

$A_{ст}$ – амплітуди коливань станини, виміряної у певному місці;

$\lambda = 0{,}6$ – логарифмічний декремент коливань.

З використанням наведених залежностей можна отримати деяку додаткову інформацію, яка придатна для порівняльного оцінювання опор.

За формулою (2) для області частот $f / f_0 > 2$, яка характерна для активної віброізоляції, можна орієнтовно визначити частоту власних коливань *як* $f_0 = f / (3\ldots4)$. Частоту f коливань збуджуючої сили, об/хв, визначають за відомим значенням найнижчої частоти n обертання шпинделя: $f = n / 60$, Гц. Більш точне значення можна отримати за використання формули $f_0=\sqrt[5]{\frac{K_{ПZ}}{\Delta_G}}$, Гц, де Δ_G – статична деформація опори від ваги верстата, см [3].

У формулі (4) показано, що коефіцієнт передачі практично має дві складові k_1 – коефіцієнт передачі коливань від основи до станини, що визначається параметрами верстата й опор (зокрема й демпфіруванням) як однієї маси, та γ – коефіцієнт передачі

коливань станини в зону різання, що визначається лише параметрами верстата й характеризує чутливість верстата до коливань основи. Чим менший коефіцієнт k_1, тим меншою є амплітуда коливань верстата, тим кращою є віброізоляція.

За формулою (5) можна визначити $A_{рі\text{-}заг}$ у зоні резонансу та оцінити точність обробки [3]:

$$A_{рі-заг} = A_{осн} \frac{\pi\gamma}{f^2}\left(\frac{f_0^2}{\lambda}\right) \quad (6)$$

Вираз $\frac{f_0^2}{\lambda}$ є характеристикою віброізоляції верстата, може застосовуватись для порівняльного оцінювання.

Наприклад, відомо, що амплітуди вертикальних коливань підлоги у цехах, де встановлені точні верстати, зазвичай не перевищують $A_{осн}$ = 1,5-2 мкм. Щоб отримати поверхню із середньою висотою мікронерівностей R_a = 0,16 мкм, амплітуди $A_{рі\text{-}заг}$ відносних коливань у зоні різання не повинні перевищувати 0,5 R_a = 0,08 мкм. Тоді коефіцієнт передачі становить:

$$K_n = \frac{A_{рі-заг}}{A_{осн}} = \frac{0,08}{(1,5...2)} \sim 0,05,$$

а коефіцієнт передачі вертикальних коливань у зону різання:

$$\gamma_Z = \frac{K_n}{k_1} = \frac{0,05}{5...10}.$$

І тут ми постаємо перед проблемою конкретизації величини коефіцієнта k_1, нехай навіть у діапазоні, відомому з експериментальних досліджень (до речі, досить давніх [1]).

За експериментальними даними (знову ж таки досить давніми) можна визначити, за якої саме частоти вертикальних коливань станини на опорах забезпечується потрібний (визначений) коефіцієнт γ_z передачі вертикальних коливань у зону різання. Ця інформація дозволить обґрунтовано обрати конкретні вібраційні опори. Так, наприклад, за k_1= 5 отримаємо коефіцієнт γ_z = 0,01, який може бути забезпечений при частоті вертикальних коливань станини на опорах ≈ 17 Гц [1; 2].

Можна за потребою визначити амплітуду відносних коливань між інструментом та заготовкою $A_{рі\text{-}заг} = K_n \cdot A_Z$ і таким чином приблизно оцінити точність обробки. Наприклад, для фрезерних верстатів рівень вібрацій становить $A_{осн} = A_z$ = 3…7 мкм [6]. Визначено, що при встановленні верстата на пружні опори з власною частотою 15 Гц величина загального коефіцієнта передачі коливань становить близько 0,1 (визначено експериментально, наприклад, [1; 3]). Тобто маємо $A_{рі\text{-}заг}$ = 0,1 · (3…7) = 0,3…0,7 мкм.

Подібний розрахунок віброізоляції є оціночним. Діюче навантаження вважаємо гармонічним (у літературних джерелах розглянуті й інші випадки навантаження). Приблизно розраховано ефективність віброізоляції зони різання верстата від зовнішніх джерел збудження, амплітуда відносних коливань інструмента та оброблюваної деталі, за якою можна приблизно оцінити точність обробки.

Точніший розрахунок параметрів віброізоляції верстата неможливий через брак вихідних даних. Він вимагає створення динамічної моделі та виконання досліджень динаміки верстата та процесу різання, зокрема вібраційних процесів. Але навіть у такому спрощеному вигляді розрахунок свідчить про придатність обраних віброопор.

Висновок. Багато фірм випускають віброопори, зокрема й гумометалеві, які рекомендують використовувати для встановлення обробного обладнання середніх розмірів. А ось як конкретно обрати такі опори користувачу? Як впевнитись у їхній придатності за

конкретних умов експлуатації? У технічних характеристиках наведено дуже мало інформації: вага, яку може сприймати опора, та межі регулювання по висоті. Спрощений розрахунок не дасть впевненості щодо встановлення точного обладнання. У кожному випадку виконувати спеціальні дослідження динаміки процесу різання? Це може зробити фахівець і то не аби-який, і то доцільно лише на етапі проєктування. А як врахувати умови майбутньої експлуатації?

Ця проблема стає нагальною для невеликих підприємств або в разі використання модернізованого обладнання. Додайте сюди ще й проблему встановлення обладнання на міжповерхових перекриттях, що вимагає оцінки параметрів будівельної конструкції [4; 7].

Єдині більш-менш доступні і конкретні рекомендації з того, на що звернути увагу та які параметри порівняти, досить давні і не дуже конкретні. Вони повторюються із незначними уточненнями. Нам не вдалося знайти щось сучасніше, за винятком методик та результатів експериментальних досліджень, які, попри те, що є цікавими, не придатні для нашої мети. На наш погляд, потрібна нам інформація щодо порівняльного оцінювання й вибору вібраційних опор для встановлення верстатів та іншого технологічного обладнання повинна бути широко доступною й бути викладена у формі, зрозумілій для не фахівця з області динаміки процесів обробки й відповідного обладнання. Так, фірми пропонують свою допомогу щодо вибору віброопор. А якою методикою вони користуються? Невідомо. Ще раз підкреслюємо, що в цьому питанні ми стоїмо на позиції пересічного користувача. Людина з відповідною інженерною освітою скоріш за все спроможна виконати розрахунки й обґрунтувати свій вибір. Ще є додаткова перевага у можливості здійснити порівняльне оцінювання опор різних виробників, бо на сайтах пропонують підібрати серед продукції власної фірми або тієї, яку реалізують. І все ж таки було б доцільно мати варіант конкретної та спрощеної методики вибору віброопор та обґрунтування їхньої придатності. Точніший розрахунок параметрів віброізоляції верстата неможливий через брак вихідних даних. Він вимагає створення динамічної моделі та виконання досліджень динаміки верстата та процесу різання, зокрема вібраційних процесів. Але навіть у спрощеному вигляді розрахунок є доцільним. У будь-якому разі рекомендації потребують відповідного оновлення і узгодження із вимогами до сучасних верстатів.

Список використаних джерел

1. Каминская В. В. Фундаменты и установка металлорежущих станков / В. В. Каминская, Д. Н. Решетов. – М. : Машиностроение, 1975. – 208 с.

2. Установка металлорежущих станков: методические рекомендации / сост. В. В. Каминская, В. А. Исаева. – М. : ВНИИТЭМП, 1985. – 39 с.

3. Орликов М. Л. Динамика станков / М. Л. Орликов. – К. : Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 272 с.

4. Руководство по проектированию виброизоляции машин и оборудования / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко – М. : Стройиздат, 1972. – 160 с.

5. Гаврилин А. Н. Диагностика технологических систем : учебное пособие. Ч. 2 / А. Н. Гаврилин, Б. Б. Мойзес. – Томск : Томский политехнический университет, 2014. – 128 с.

6. Рябов С. А. Установка и монтаж металлорежущих станков: учеб. пособие / С. А. Рябов, А. С. Глинка. – Кемерово : КузГТУ, 2012. – 121 с.

7. Комкин А. И. Вибрация. Воздействие, нормирование, защита / А. И. Комкин // Приложение к журналу Безопасность жизнедеятельности. – 2004. – № 5. – 47 с.– Изд. Новые Технологии.

8. Пружинні віброопори Vibrofix Spring [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://xn--80asiijdci.com.ua/ua/p436456697-pruzhinnye-vibroopory-vibrofix.html.

9. Виброопоры под любой тип оборудования весом от 20 кг до 20 тонн [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gb-trade.com.ua/ua.

10. Виброопоры ОВ-31МП для легких, средних и тяжелых станков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://izi.ua/p-2304722-vibroopory-ov-31mp-dlya-legkikh-srednikh-i-tyazhelykh-stankov.

11. Правильний вибір віброопори, віброізоляція верстатів і промислового устаткування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://jak.koshachek.com/articles/pravilnij-vibir-vibrooporami-vibroizoljacija.html.

12. Как подобрать виброопоры и виброподушки для станков и оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступу: https://stanokgid.ru/osnastka/vibroopory-dlya-oborudovaniya.html.

13. Анализ технологичности изготовления виброопор [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://gigabaza.ru/doc/43358.html.

14. Расчет пружинных виброизоляторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studfile.net/preview/5780931/page:6.

References

1. Kaminskaya, V.V., Reshetov, D.N. (1975). *Foundations and installation of metal-cutting machines [Fundamenty i ustanovka metallorezhushchikh stankov]*. Mashinostroenie.

2. Kaminskaia, V.V., Isaeva, V.A. (1985). *Ustanovka metallorezhushchikh stankov: metodicheskiye rekomendatsii [Installation of metal-cutting machines: guidelines]*. VNIITEMP.

3. Orlikov, M.L. (1989). *Dinamika stankov [Dynamics of machine tools]*. Vyshcha shkola. Golovnoe izd-vo.

4. TSNIISK im. V. A. Kucherenko. (1972). *Rukovodstvo po proektirovaniiu vibroizoliatsii mashin i oborudovaniia [Guidelines for the design of vibration isolation of machines and equipment]*. Stroyizdat.

5. Gavrilin, A.N., Moyzes, B.B. (2014). *Diagnostika tekhnologicheskikh sistem [Diagnostics of technological systems]* (Vol. 2). Tomskiy politekhnicheskiy universitet.

6. Riabov, S.A., Glinka, A.S. (2012). *Ustanovka i montazh metallorezhushchikh stankov [Installation and installation of metal-cutting machines]*. KuzGTU.

7. Komkin, A.I. (2004). Vibratsiia. Vozdeistvie, normirovanie, zashchita [Vibration. Impact, rationing, protection]. *Prilozhenie k zhurnalu Bezopasnost zhiznedeiatelnosti – Published in the appendix to the journal Life Safety*, (5).

8. *Pruzhynni vibroopory Vibrofix Spring [Vibrofix Spring Vibrofix springs]*. https://xn--80asiijdci.com.ua/ua/p436456697-pruzhinnye-vibroopory-vibrofix.html.

9. *Vibroopory pod lyuboy tip oborudovaniya vesom ot 20 kg do 20 tonn [Vibration supports for any type of equipment weighing from 20 kg to 20 tons]*. https://gb-trade.com.ua/ua.

10. *Vibroopory OV-31MP dlya legkikh, srednikh i tyazhelykh stankov [OV-31MP vibration mounts for light, medium and heavy machines]*. https://izi.ua/p-2304722-vibroopory-ov-31mp-dlya-legkikh-srednikh-i-tyazhelykh-stankov.

11. *Pravylnyi vybir vibroopory, vibroizoliatsiia verstativ i promyslovoho ustatkuvannia [Correct choice of vibration support, vibration isolation of machine tools and industrial equipment]*. https://jak.koshachek.com/articles/pravilnij-vibir-vibrooporami-vibroizoljacija.html.

12. *Kak podobrat vibroopory i vibropodushki dlya stankov i oborudovaniia [How to choose vibration supports and vibration cushions for machine tools and equipment]*. https://stanokgid.ru/osnastka/vibroopory-dlya-oborudovaniya.html.

13. *Analiz tekhnologichnosti izgotovleniya vibroopor [Analysis of the manufacturability of the manufacture of vibration mounts]*. https://gigabaza.ru/doc/43358.html.

14. *Raschet pruzhinnykh vibroizolyatorov [Calculation of spring vibration isolators]*. https://studfile.net/preview/5780931/page:6.

Отримано 05.06.2022

UDC 621.9.04

Iryna Verba[1], Oleksandr Danylenko[2], Nazar Porhun[3]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: verba.dan@gmail.com. **ORCID** http://orcid.org/0000-0003-1891-7215. **ResearcherID:** ABM-1532-2022

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: alednlnk@gmail.com. **ORCID** https://orcid.org/0000-0001-6585-7724. **ResearcherID:** ABN-8993-2022

[3]bachelor's Degree in Specialty 131 "Applied mechanics" educational professional program "Technologies of computer design of machine tools, robots and machinery"
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: nazar.porhyn.07@gmail.com

HOW TO CHOOSE VIBRATION SUPPORTS FOR THE MACHINE? THE QUESTION WITHOUT THE ANSWER

The article contains a scientific and methodical study on the installation of machines tool and other equipment directly on antivibration supports and the selection of specific types of these supports based on comparative evaluation and with confirmation of their compliance with operational requirements. The results of the research are relevant and can be applied by engineering and technical workers of machinery manufacturing plant in the case of modernization of existing equipment, primarily at small enterprises, since the solution of the problem should not involve complex dynamic studies and calculations that require appropriate specialists and equipment.

The main attention is paid to consideration of different types of antivibration supports. The correct choice of supports makes it possible to isolate the equipment from the action of internal (caused by the design of the machine tool and the cutting process itself) and external vibrations and to ensure both the accuracy of the relative location and movement of the machine units, as well as the reduction of the level of elastic movements and amplitudes of oscillations. The best option is the experimentally based recommendation of the manufacturing plant regarding the suitability of the selected supports, but it is valid for new machines tool, and even then, the operating conditions are not properly considered. The analysis of information sources showed that, despite the presence of dynamic studies, the necessary information is missing or quite outdated and generalized, which allows it to be used as an estimate, but not as final. The recommendations need to be updated accordingly and reconciled with the requirements for modern machines tool.

Keywords: *vibration support; vibration isolation; transmission of vibrations; foundation of the machine; elastic materials.*
Fig.: 4. References: 14.

Верба І., Даниленко О., Порхун Н. Як обрати вібраційні опори для верстата? Питання без відповіді. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 57-68.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-69-75

УДК 678.01:539.53:539.21

Ольга Набережна

[1]кандидат технічних наук, асистент кафедри фізики конденсованого стану
Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)
E-mail: o.naberezhnaya@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1302-4098
ResearcherID: T-2024-2019. **Scopus Author ID:** 57189904509

УЗК-ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВУГЛЕЦЕВИХ ВОЛОКОН НА ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ НА ОСНОВІ ПОЛІФЕНІЛЕНСУЛЬФІДУ

У роботі розглянуто суперконструкційні пластики (поліфеніленсульфід) і отримані за рахунок армування вуглецевим волокном – вуглепластики. У статті представлені результати механічних випробувань поліфеніленсульфіду та вуглепластиків на його основі, визначені основні показники: міцність, відносна деформація і модуль пружності, мікротвердість. Показано, що для оцінки міцнісних характеристик композицій на основі ПФС може використовуватися метод акустичної дефектоскопії – ультразвуковий контроль. Запропонований неруйнівний підхід дослідження вуглепластиків на основі ПФС, який за результатами корелює з лабораторними дослідженнями властивостей матеріалів. Наведено імпульси відбитих «донних» сигналів і визначено швидкість поширення хвилі в матеріалі.

Ключові слова: *поліфеніленсульфід; вуглецеве волокно; вуглепластик; полімерний композиційний матеріал; характеристики міцності; ультразвукова дефектоскопія.*

Рис.: 4. Табл.: 2. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Поліфеніленсульфіди (ПФС) є одними з пластиків з дійсно видатними характеристиками. Вони володіють хорошими механічними властивостями, термостійкістю, радіаційною стійкістю, стійкістю до різних агресивних середовищ (за хімічною стійкістю, наприклад, поліфеніленсульфід поступається лише політетрафторетилену). ПФС належить до класу негорючих матеріалів, їм притаманна висока адгезія до металів [1]. ПФС не плавиться за температури наближеної до 573 ºС. До того ж він стійкий до впливу полум'я. Переробники, що працюють у галузі виробництва пластмас, називають пластики з дуже хорошими характеристиками, як, наприклад, ПФС, суперконструкційними пластиками [2]. А введення до складу матриці вуглецевих волокон сприяє ще більш розширеним можливостям їх використання.

Вуглепластики (ВП) відрізняються від традиційних конструкційних матеріалів поєднанням таких властивостей, як високі питомі міцність і жорсткість, низькі коефіцієнти лінійного термічного розширення і тертя, висока зносостійкість і стійкість до впливу агресивних середовищ, термічного й радіаційного ударам, температурного розширення та електрофізичні властивості, що змінюються у широких межах, висока втомна міцність при статичних і динамічних навантаженнях [5]. Зазначені властивості ВП визначили їх переважне використання в оборонних галузях промисловості й насамперед в авіаційній і ракетобудівній техніці. Велика кількість елементів конструкцій військових літаків, бойових та дослідницьких космічних апаратів і ракет (у тому числі й космічний комплекс «Енергія-Буран»), антен і антенних обтічників виконано з ВП [6]. Використання вуглепластиків в оборонній техніці робило практично недоступною інформацію про них для широкого кола фахівців у різних галузях промисловості.

Постановка проблеми. Властивості вуглепластиків вивчалися різними методами і з різних позицій [1-4]. Однак різноманіття самих матеріалів, широта сфер використання і складність спектра їх властивостей як і раніше викликають активний інтерес до них з боку дослідників. Особливо гостро стоїть питання визначення довговічності без ушкодження деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У більшості робіт [3-6] представлено розробку полімерних композиційних матеріалів на основі вуглецевих тканин та обговорено складності виготовлення та проблему адгезії полімеру та наповнювача. Для оцінки потенціалу таких ВП, як конструкційних матеріалів проведено багато досліджень дефектності їхньої структури та характеристик міцності зразків із дефектних та бездефектних зон.

© Набережна О. О., 2022

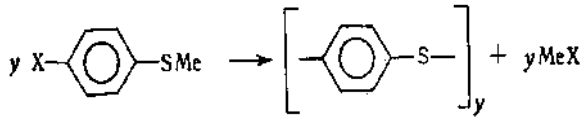
На жаль, особливості переважної галузі використання вуглепластиків робило інформацію про результати цих досліджень малодоступною. Однак вивчення і аналіз фізичних процесів вуглепластиків становить інтерес не тільки чисто практичний, але й загальнонауковий, особливо в зіставленні з композиційними матеріалами інших видів і класів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання вибору та розподілення вуглецевого волокна має сильний вплив на кінцеві показники властивостей матеріалу. Для поліпшення експлуатаційних характеристик до складу ПФС вводили дискретні вуглецеві волокна (ВВ) [3; 4]. У роботі запропоновано неруйнівний метод дослідження готових виробів.

Враховуючи вищевикладене, **метою статті** було дослідження впливу вуглецевих волокон на механічні властивості вуглепластиків на основі ПФС та проведення ультразвукового дослідження матеріалів на визначення дефектності.

Об'єкти та методи досліджень

Поліфеніленсульфіди утворюються при конденсації n-галоїдтіофенолятів у розчині піридину за реакцією:



Вони стабільні в повітрі й у атмосфері азоту до 673 К [7].

Внаслідок жорстколанцюгової структури, вузького температурного інтервалу переходу ПФС у в'язкотекучий стан, що межує з температурою деструкції, виникають певні труднощі при його переробці методами екструзії та лиття під тиском. Враховуючи це, для переробки ПФС та ВП на його основі у вироби, був обраний метод компресійного пресування.

Для армування використовували вуглецеві волокна «Toreyka» T700SC (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристики міцності вуглецевого волокна «Toreyka»

Міцність при розтягуванні, МПа, не менш	4200
Модуль пружності при розтягуванні, ГПа, не менш	1700
Густина, г/см^3	1,80
Лінійна щільність, текс.	800±20

Наповнення полімеру ПФС вуглецевими волокнами здійснювали шляхом змішування компонентів у електромагнітному полі, що обертається, за участі феромагнітних частинок. Їх переробку в блокові вироби здійснювали методом компресійного пресування при температурі 503-553 К та тиску 85 МПа.

Механічні характеристики: міцність ($\sigma_{стис.}$), відносна деформація (ε) і модуль пружності (Е) при стисканні визначали на машині SANS (згідно зі стандартом Китаю GB/T 2569-1995) швидкість переміщення траверси 2 мм/ хв. Для досліджень використовували зразки діаметром 10 і висотою 12 мм.

Неруйнівний контроль якості матеріалів визначали ехоімпульсним методом за допомогою універсального ультразвукового дефектоскопа УД2В-П46 («КРОПУС», ТОВ «НВП Укрінтех»), у режимі АСД, частота 5 МГц, період 2,5, ПЕП 5 МГц.

Дослідження мікроструктури проводилося на мікроскопі «Біолам-М», збільшення 100.

Густину визначали адитивним та гідростатичним методом згідно з ГОСТ 15139-69.

Результати та їх обговорення. Враховуючи те, що однією з основних галузей використання розроблених вуглепластиків є машинобудування, зокрема деталі рухомих з'єднань, особлива увага при вивченні фізико-механічних властивостей була приділена міцності при стисненні ($\sigma_{сж.}$), оскільки цей показник дає можливість передбачити вантажопідйомність вузла тертя, укомплектованого деталями з вуглепластиків. Результати механічних показників представлені на рис. 1 та в табл. 2 [7].

Таблиця 2 – Фізико-механічні характеристики

Показники	Вміст вуглецевого волокна «Toreyka», мас. %				
	0	5	10	15	20
$\sigma_{стис.}$, МРа	147	203	174	219	247
ε, %	15	16	10	9	12
Е, МРа	3059	4011	5102	4625	3008
HV	26,4	29,7	30,6	28,9	26,8

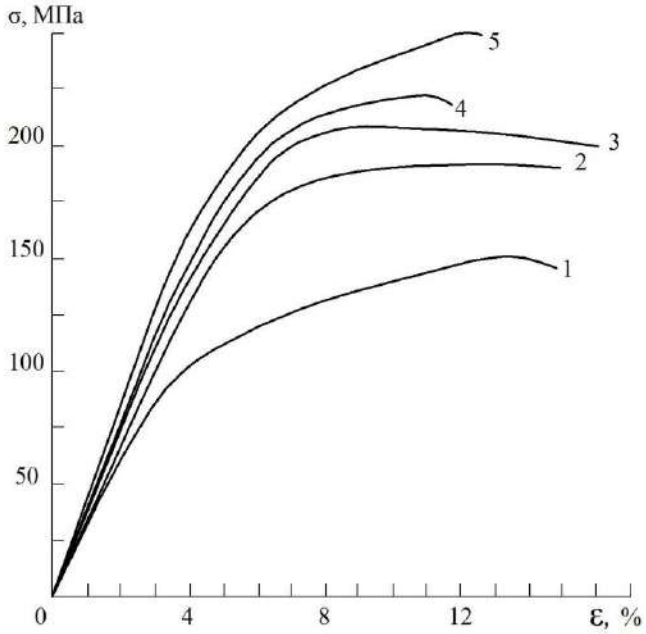


Рис. 1. Криві σ-ε ПФС (1) та ВП на його основі, що містять 5 (2), 10 (3), 15 (4) та 20 (5) мас. % ВВ

Встановлено, що криві σ-ε ПФС і ВП на його основі відносяться до II типу, згідно з класифікацією Херцберга [5] (рис. 1), межа міцності при стисканні вихідного ПФС збільшується прямо пропорційно до вмісту вуглецевого волокна (у 1,2 - 1,7 раза). Особливо суттєве підвищення міцності при стисканні спостерігається при введенні 15-20 мас. % вуглецевого волокна. Що ж до модуля пружності, він зростає лише при 5-15 мас.% відсотковому наповненні, далі – знижується.

Це збільшення можна пояснити ефектом міжструктурного наповнення, коли частинки волокна розміщуються на межах поділу надмолекулярних утворень у місцях дефектів і впливають на гнучкість полімерних макромолекул. Поблизу поверхні наповнювача відбувається обмеження рухливості елементів надмолекулярних структур, яке не залежить від природи полімеру і наповнювача. Це призводить до деякої зміни еластичності матеріалу [7] і, отже, до зміни значень мікротвердості (табл. 2). Нині відомо [8], що мікротвердість HV є властивістю, чутливою до морфологічних і до структурних змін у полімерних матеріалах.

Для вивчення міцнісних характеристик композицій на основі ПФС застосовувався метод акустичної дефектоскопії – ультразвуковий контроль, який знайшов найбільше застосування через свою простоту й високу продуктивність, надійність і універсальність [9]. Ультразвукові випробування дозволяють визначати не тільки тріщини, мікротріщини, і т. ін., але і ступінь втрати працездатності виробів до настання зовнішніх ознак руйнування, тобто. прогнозувати довговічність.

Дослідження проводилися за допомогою імпульсного ехометоду, заснованого на збудженні в контрольованому виробі коротких імпульсів високочастотних коливань та реєстрації інтенсивності та часу ехосигналів, відбитих від дефектів або меж виробу.

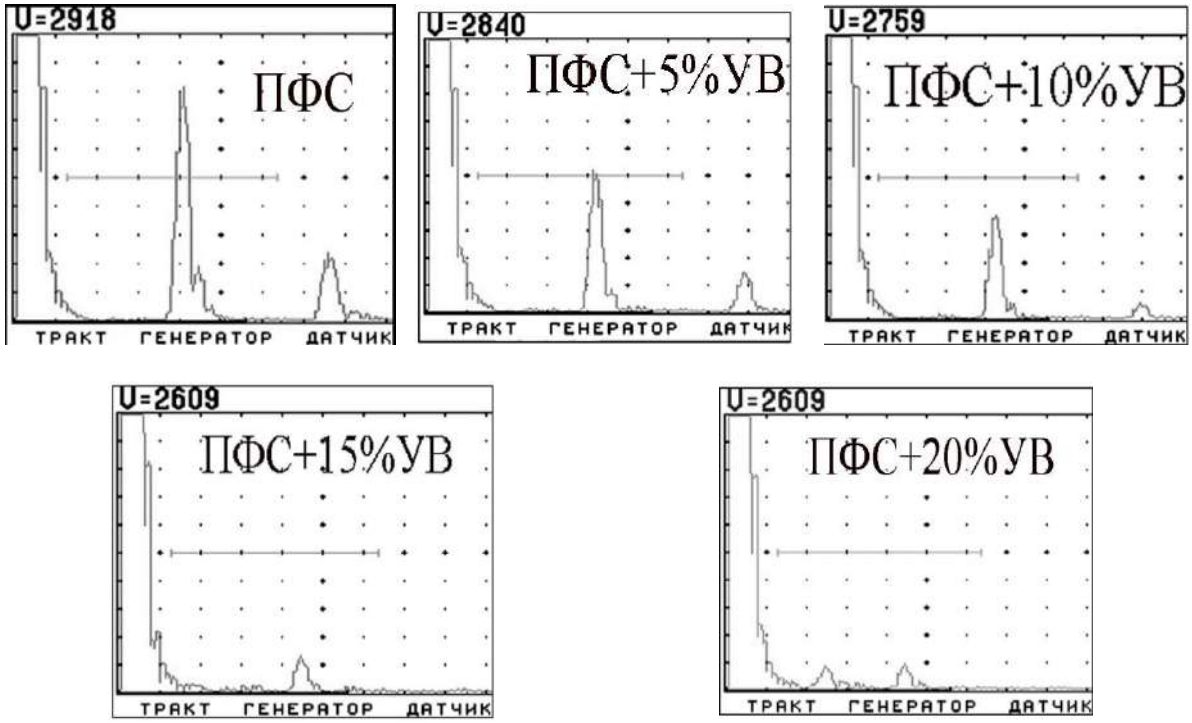


Рис. 2. Імпульси відбитих «донних» сигналів

Дефектоскопія пластмас найбільш часто здійснюється методом прямого відбиття. Пластмаси мають менші швидкості поширення ультразвуку і володіють значними величинами згасання, в порівнянні з металами, що дозволяє досліджувати зразки малої товщини (3 – 4 мм). У цьому зв'язку, у розроблених нами матеріалах проводилось оцінювання відбитого «донного» імпульсу, швидкості поширення хвилі, і, навіть, довжини шляху ультразвуку (рис. 2).

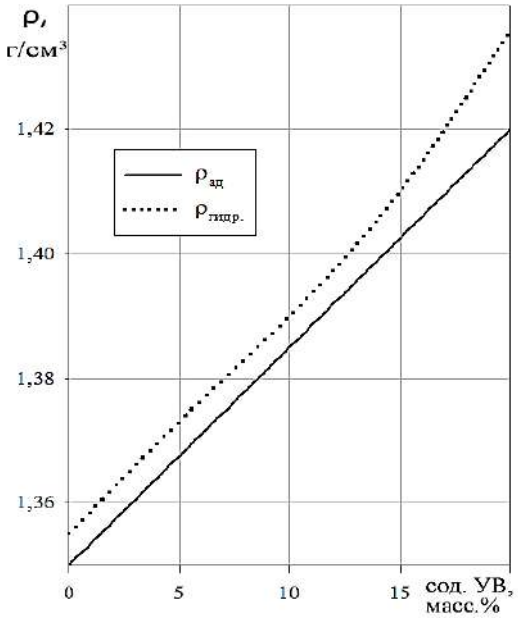
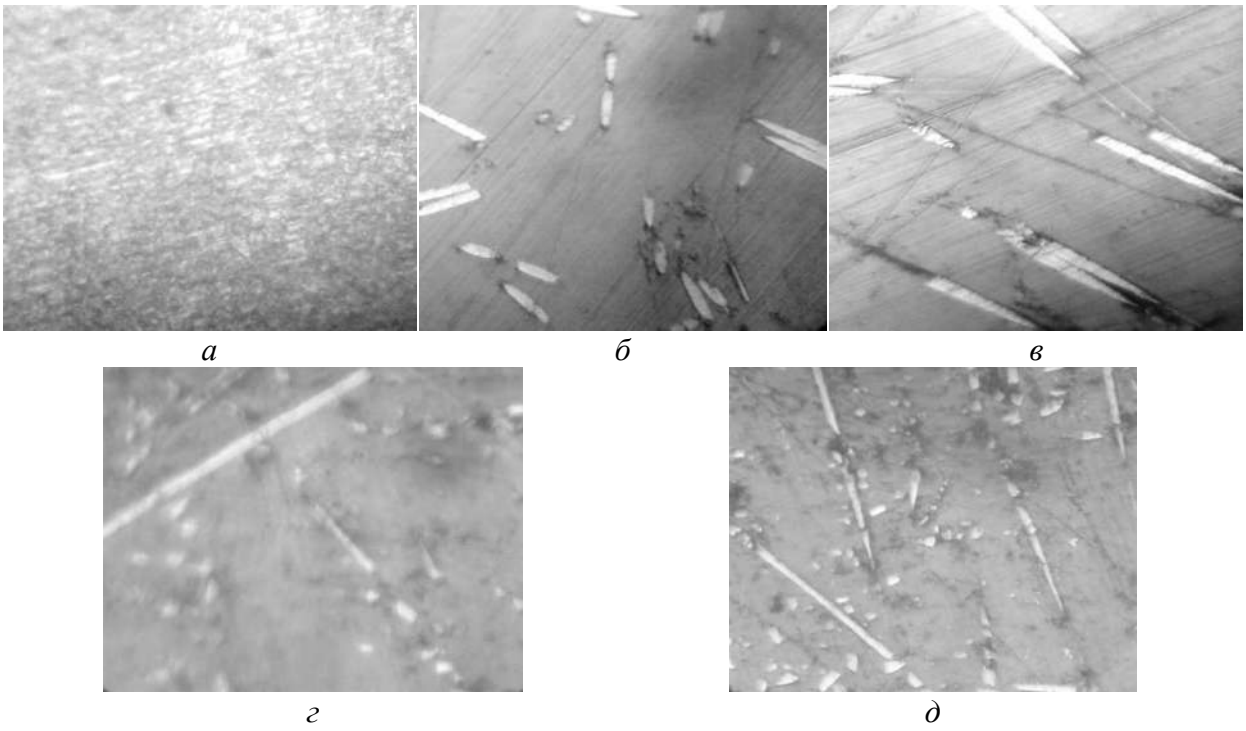


Рис. 3. Адитивна та гідростатична щільність ВП із вмістом 5-20 мас.% ВВ

Представлені на рис. 3 дані показали симбатність зміни значень щільності й масового вмісту волокна, що, у свою чергу, говорить про незмінну полімерну структуризацію. Швидкість поширення ультразвукової хвилі в ВП варіювалася в межах 2907 - 2967 м/с, час проходження 5,25 - 6,25 мкс, «донний» сигнал спостерігався в усіх досліджуваних зразках.



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 4. Мікроструктура ПФС (а) та ВП на його основі, із вмістом наповнювача: 5(б), 10(в), 15(г), 20(д) мас.% ВВ

Як видно з представлених даних, спостерігається ослаблення ультразвуку на 80 %, зі збільшенням відсоткового вмісту наповнювача в сполучному, при цьому немає численних внутрішніх відображень (характерно для волокнисто наповнених матеріалів) [10]. Це свідчить про хорошу адгезію вуглецевого волокна з ПФС, а також про підвищення міцності, що добре корелює з отриманими механічними характеристиками.

Отримані результати також описують рівномірність розподілу наповнювача в сполучному (рис. 4), а також характеризують отриманий матеріал як кристалічний.

Висновки. Загалом у роботі запропоновано неруйнівний підхід дослідження вуглепластиків на основі ПФС, який за результатами корелює з лабораторними дослідженнями властивостей матеріалів. Проведений аналіз фізико-механічних властивостей показав, що отриманні ВП характеризуються досить високими показниками міцності. Це дає можливість рекомендувати їх для заміни термопластичних і термореактивних полімерів, особливо в машинобудуванні.

Список використаних джерел

1. Oliveux G. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties / G. Oliveux, L. O. Dandy, G. A. Leeke // Progress in Materials Science. – 2015. – Vol. 72. – Pp. 61-99.

2. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра / Е. Н. Каблов // Металлы Евразии. – 2015. – № 1. – С. 36-39.

3. Петров А. В. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) [Электронный ресурс] / А. В. Петров, М. С. Дориомедов, С. Ю. Скрипачев // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журнал. – 2015. – № 8. – С. 78-94. – Режим доступу: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9.

4. Дасковский М. И. Систематизация базисных факторов, препятствующих внедрению полимерных композиционных материалов (обзор) [Электронный ресурс] / М. И. Дасковский, М. С. Дориомедов, С. Ю. Скрипачев // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журнал. – 2016. – № 5. – С. 104-112. – Режим доступу: www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-6-6.

5. Переработка армирующих наполнителей при утилизации изделий из ПКМ / М. С. Дориомедов, А. В. Петров, М. И. Дасковский, С. Ю. Скрипачев // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журнал. – 2016. – № 8. – С. 122-137. – DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-12-12.

6. Петров А. В. Зарубежный опыт развития производства изделий с использованием вторично переработанных полимерных композиционных материалов (обзор) [Электронный ресурс] / А. В. Петров, М. С. Дориомедов, С. Ю. Скрипачев // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журнал. – 2015. – № 12. – С. 166-178. – DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-12-12.

7. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсен. – М. : Химия, 1978. – 423 с.

8. Херцберг Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р. В. Херцберг. Пер. с англ. / под ред. М.Л. Бернштейна. – М. : Металлургия, 1989. – 560 с.

9. Synthetic polymer-polymer composites / ed. by D. Bhattacharyya, S. Fakirov. – Munich : Hanser Publishers, 2012. – 819 p.

10. Потапов А. И. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов / А. И. Потапов, Ф. П. Пеккер. – Л. : Машиностроение, 1977. – 192 с.

References

1. Oliveux, G., Dandy, L.O., & Leeke, G.A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science, 72*, 61-99.

2. Kablov, Ye.M. (2015). Kompozyty: sohodni ta zavtra [Composites: today and tomorrow]. *Metally Evrazii – Metals of Eurasia*, (1), 36–39.

3. Petrov, A.V., Doriomedov, M.S., & Skrypachov, S.Yu. (2015). Tekhnolohiyi utylizatsiyi polimernykh kompozytsiynykh materialiv (ohliad) [Technologies for the utilization of polymer composite materials (review)]. *Pratsi VIAM – Proceedings of VIAM*, (8), 78-94.

4. Daskovskyi, M.I., Doriomedov, M.S., & Skrypachov, S.Yu. (2016). Systematyzatsiia bazisnykh chynnykiv, shcho pereshkodzhayut vprovadzhenniu polimernykh kompozytsiinykh materialiv Rosii (ohliad) [Systematization of the basic factors hindering the introduction of polymer composite materials (review)]. *Pratsi VIAM – Proceedings of VIAM*, (5), 104-112.

5. Doriomedov, M.S., Petrov, A.V., Daskovskyi, M.I., & Skrypachov, S.Yu. (2016). Pererobka armuyuchykh napovnyuvachiv pry utylizatsiyi vyrobiv z PKM [Proceedings of VIAM: electron. scientific and technical magazine]. *Pratsi VIAM – Proceedings of VIAM*, (8), 122-137.

6. Petrov, A.V., Doriomedov, M.S., & Skrypach, S.Yu. (2015). Zarubizhnyy dosvid rozvytku vyrobnytstva vyrobiv z vykorystannyam povtorno pereroblenykh polimernykh kompozytsiynykh materialiv (ohlyad) [Processing of reinforcing fillers during the recycling of products from PCM]. *Pratsi VIAM – Proceedings of VIAM*, (12), 166-178.

7. Nilsen, L. (1978). *Mekhanicheskiye svoystva polimerov i polimernykh kompozitsiy [Mechanical properties of polymers and polymer compositions]*. Khimiia.

8. Khertsberg, R.V. (1989). *Deformatsiya i mekhanika razrusheniya konstruktsionnykh materialov [Deformation and fracture mechanics of structural materials]*. Metallurgiia.

9. Synthetic polymer-polymer composites / ed. by D. Bhattacharyya, S. Fakirov. – Munich : Hanser Publishers, 2012. – 819 p.

10. Potapov, A.I., Pekker, F.P. (1977). *Nerazrushayushchiy kontrol' konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov [Non-destructive testing of structures made of composite materials]*. Mashinostroeniie.

Отримано 23.05.2022

UDC 678.01:539.53:539.21

Olga Naberezhna

[1]PhD in Technical Sciences, assistant of the department of physics of condensed steel
Dniprovsk State Technical University (Kamyanske, Ukraine)
E-mail: o.naberezhnaya@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1302-4098
ResearcherID: T-2024-2019. **Scopus Author ID:** 57189904509

ULTRASOUND RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CARBON FIBERS ON THE PROPERTIES OF CARBON PLASTIC BASED ON POLYPHENYLENE SULPHIDE

Polyphenylene sulfides are one of the plastics with truly outstanding characteristics. The introduction of carbon fibers into the composition of the matrix contributes to the expansion of their potential use. The main requirement for the obtained materials is to increase their strength indicators due to the reinforcement of the matrix frame with carbon fibers.

Carbon plastics are distinguished among other composite materials by high specific strength and stiffness, low coefficients of linear thermal expansion and friction, high wear resistance and resistance to aggressive environments. This allows their use in defense industries and, above all, in aviation and rocket engineering.

The analysis of the latest research and publications showed that the issue of selection and distribution of carbon fiber has a strong influence on the final indicators of the material's properties. To improve the operational characteristics, discrete carbon fibers were introduced into the composition of polyphenylene sulfide. The main goal of this method of obtaining composites was the uniform distribution of fibers in the polymer matrix.

The article presents the results of mechanical tests of polyphenylene sulfide and carbon plastics based on it, the main indicators are determined: strength, relative deformation and modulus of elasticity, microhardness. It is shown that the method of acoustic defectoscopy - ultrasonic control can be used to assess the strength characteristics of compositions based on polyphenylene sulfide. A non-destructive approach to the study of carbon plastics based on polyphenylene sulfide is proposed, which results correlate with laboratory studies of material properties. The pulses of the reflected "bottom" signals are given and the speed of wave propagation in the material is determined.

The analysis of the physical and mechanical properties showed that the resulting carbon-plastics are characterized by fairly high strength indicators, which makes it possible to recommend them for replacing thermoplastic and thermosetting polymers, especially in machine building.

Keywords: *polyphenylene sulfide, carbon fiber; polymer composite material; strength characteristics; ultrasonic flaw detection.*

Fig.: 4. Table: 2. References: 10.

Набережна О. УЗК-дослідження впливу вуглецевих волокон на властивості вуглепластиків на основі поліфеніленсульфіду. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 69-75.

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-76-87
УДК 611.08(611.24)

Денис Панаскін[1], Єлизавета Білоконь[2], Дмитро Бабко[3]

[1]магістр кафедри обчислювальної техніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: d_panaskin9239-1@academics.org.pl. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1966-2165

[2]магістр факультету інформаційних технологій
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: yelyz_bilokon@uni.com.nl. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6673-5910

[3]магістр факультету інформатики та обчислювальної техніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: d.babko@sc-community.be. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7510-3552

МАШИННЕ НАВЧАННЯ В ДІАГНОСТИЦІ ЗАХВОРЮВАНЬ ЛЕГЕНЕВОЇ СИСТЕМИ

Метою дослідження було порівняти точність постановки діагнозу нейромережею зі встановленим лікарями захворюванням, а також протестувати поточний метод обстеження на здорових людях. У процесі дослідження було використано теоретичні методи, діагностичні, емпіричні, методи математичної статистики та глибокого машинного навчання. Розроблена модель досягла високого рівня продуктивності, чутливість методу становила 99 %. Пропоноване авторами дослідження забезпечує досить точне розпізнавання досліджуваних хвороб легень за звуками легень. Це дослідження демонструє позитивні результати машинного навчання на обмеженій вибірці.

Ключові слова: *медицина; штучний інтелект; захворювання легень; інновації; діагностика.*
Рис.: 3. Табл.: 3. Бібл.: 28.

Актуальність теми дослідження. Хронічні респіраторні захворювання (ХРЗ) належить до найбільш поширених неінфекційних захворювань у всьому світі, переважно через повсюдне поширення шкідливих впливів навколишнього середовища, професійних і поведінкових факторів при вдиханні. Вони поширені в усьому світі й пов'язані зі значною захворюваністю та смертністю [1]. Порушення функції легень є предиктором захворюваності та смертності й може сприяти розвитку множинних патологічних процесів.

Постановка проблеми. Поганий прогноз та одужання при запальних захворюваннях легень пов'язують зі старінням імунної системи або віковими змінами вроджених та адаптивних імунних відповідей у легенях [2]. За останні два десятиліття медична практика перетворилася завдяки оцифруванню медичних даних. Цьому явищу сприяло створення, вдосконалення та інтеграція технологій медичних інформаційних систем, що, у свою чергу, призвело до створення медичної інформатики, яка була визначена як галузь, що займається когнітивними, інформаційними та комунікаційними завданнями медичної практики, освіти та досліджень [3; 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Штучний інтелект (ШІ) був уперше описаний у 1950 році, проте деякі обмеження в ранніх моделях не дозволили широко прийняти та застосувати його в медицині. На початку 2000-х років багато цих обмежень були подолані з появою глибокого навчання. Тепер системи штучного інтелекту здатні аналізувати складні алгоритми та самонавчати. У 2017 році управління із санітарного нагляду за якістю харчових продуктів та медикаментів (FDA) у США схвалило перший продукт – CardioAI, створений на базі технології глибокого навчання для охорони здоров'я. CardioAI був здатний аналізувати магнітно-резонансні зображення серця за лічені секунди, надаючи таку інформацію як фракція викиду серця. Далі ця програма розширилася і тепер включає обробку знімків печінки і легень, рентгенівські знімки грудної клітини й опорно-рухового апарату, а також КТ (комп'ютерна томографія) – зображення голови без контрастування.

© Панаскін Д. В., Білоконь Є. О., Бабко Д. С., 2022

Глибоке навчання може застосовуватися для виявлення поразок, диференціальної діагностики і складання автоматизованих медичних звітів. У 2017 році цю технологію почали використовувати для скринінгу діабетичної ретинопатії, досягнувши 94 % чутливості та 98 % специфічності з 5-кратною перехресною перевіркою. Далі глибоке навчання було успішно застосовано для виявлення немеланомних та меланомних видів раку шкіри, прогнозування ризику серцево-судинних захворювань, виникнення та прогнозування прогресування хвороби Альцгеймера шляхом аналізу даних візуалізації амілоїду, а також точного прогнозування відповіді на лікарську терапію при цьому захворюванні [5]. У декількох роботах було застосовано штучну нейронну мережу, засновану на застосуванні згорткових шарів (CNN) для класифікації респіраторних захворювань. Запропонований метод застосовувався для аналізу спектральних характеристик звуків аускультації легень, включаючи спектрограми та мел-кепстральні коефіцієнти. Крім цього, було порівняно використання згорткових нейронних мереж із класичними методами штучного інтелекту, такими як SVM та KNN і доведена можливість отримання вищої точності із застосуванням глибокого навчання [6; 7].

У межах іншого дослідження було детально розглянуто можливості роботи з незбалансованими наборами даних у межах медичного домену та запропоновано спосіб збагачення даних за допомогою варіаційних автоенкодерів (VAE) із подальшою класифікацією за допомогою згорткових нейронних мереж (CNN). У роботі доводиться можливість використання методів аугментації для досягнення кращих результатів за обраними метриками [8]. Таким чином, досвід застосування ШІ наближає до часу, коли штучний інтелект можна буде застосовувати у клінічній практиці за допомогою моделей оцінки ризиків, підвищуючи точність діагностики ефективності робочого процесу [5]. Методи штучного інтелекту можуть діяти як симуляція людського розуму та інтелекту, що призводить до аналізу та класифікації складних даних за короткий час [9].

Використання ШІ в медицині й зокрема в пульмонології стає дедалі більш актуальною темою. Машинне навчання є частиною ШІ, де комп’ютери використовують статистичні методи для навчання самостійно без явного програмування [10]. З 2015 року помітно прискорилися дослідження в галузі штучного інтелекту в медицині, особливо у сфері діагностики та лікування захворювань органів дихання. Глибокі нейронні мережі стають ключовим інструментом у розробці біомаркерів візуалізації для діагностики, прогнозу захворювання та прогнозної реакції на терапію. Вони мають великий потенціал для охоплення областей за межами візуалізації, таких як тести легеневої функції та фізіологічні біосигнали [11]. Таким чином, продовжують накопичуватися відомості про застосування штучного інтелекту та глибокого навчання в діагностиці захворювань, у тому числі хвороб легень.

Метою дослідження було порівняти точність постановки діагнозу нейромережею порівняно зі встановленим лікарями захворюванням, а також протестувати поточний метод обстеження на здорових людях. Автори поставили завдання вивчити здібності глибокого навчання, що проілюстроване глибокими нейронними згортковими мережами і довгостроковими одиницями короткочасної пам'яті, розпізнавати легеневі захворювання за звуковими сигналами легень.

Матеріали та методи. У процесі дослідження було використано такі теоретичні методи (аналіз літератури, узагальнення); діагностичні (анамнестичне опитування, використання електронного стетоскопа); емпіричні (вивчення досвіду роботи медичних організацій, нормативної документації); методи математичної статистики та глибокого машинного навчання. Для вивчення здатності глибокого навчання, що проілюстроване глибокими згортковими нейронними мережами та довгостроковими одиницями короткочасної пам'яті, розпізнавання легеневих захворювань за звуковими сигналами легень авторами були отримані дані сигнали із записів електронних стетоскопів. Записи – це

аускультативні шуми від пацієнтів, які страждають на астму, пневмонію, хронічну обструктивну хворобу легень і серцеву недостатність разом із контрольними шумами від здорових пацієнтів. Кожен сигнал спочатку проходив процедуру попередньої обробки, щоб забезпечити найкраще можливе введення в мережу глибокого навчання (рис. 1).

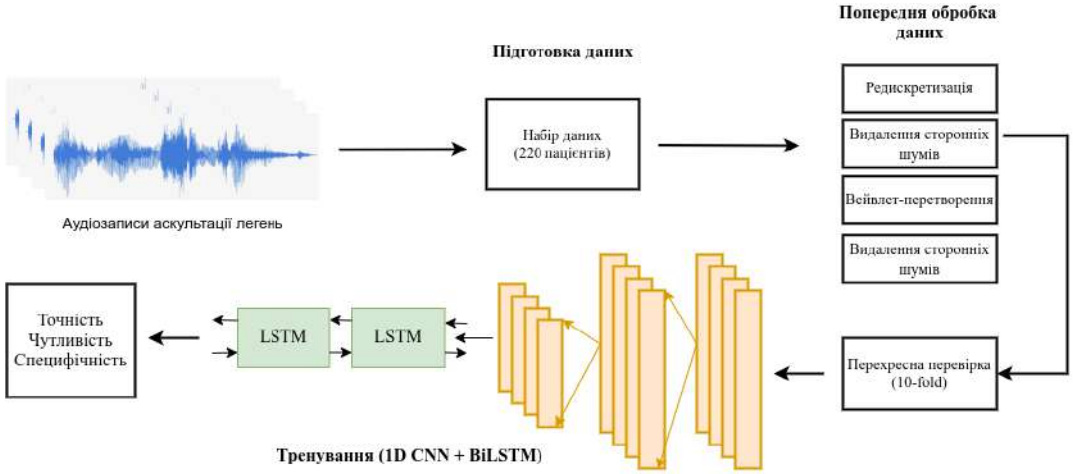


Рис. 1. Конвеєр обробки даних запропонованого методу

Як і у будь-якого іншого біологічного сигналу, записаного в електронному вигляді, записи звуку в легенях спотворюються акустичним шумом, викликаним навколишнім шумом, фоновими розмовами, електронними перешкодами або будь-яким зміщенням стетоскопа [12]. Тому в поточному дослідженні використовувалася попередня обробка аудіо. Її етапи включали видалення сторонніх шумів, вейвлет-перетворення і нормалізацію. Вейвлет перетворення широко використовується для аналізу нестаціонарних сигналів. Його основна ідея – використання материнського вейвлета для перетворення та розширення сигналу в різні функції [13]. У межах цієї роботи було розглянуто використання вейвлетів сімейства Добеші восьмого порядку з метою згладжування форми вихідного сигналу. Після цього оброблений сигнал було приведено до нормального розподілу за допомогою методу стандартизації для покращення розповсюдження градієнтів у нейронній мережі.

Звуки записувалися за допомогою одноканального електронного стетоскопа, розміщеного у верхній, середній або нижній лівій/правій частинах грудної клітки. Тривалість аудіопотоку становила від 20 до 80 секунд та включала декілька дихальних циклів. Усі сигнали зазнавали повторної дискретизації з частотою дискретизації 4 кГц. Для реєстрації та розмітки легеневих звуків по класах було застосовано метод експертних оцінок. Експерименти проводилися на процесорі Intel (i7-9700) із 32 ГБ оперативної пам'яті. Стандартні показники якості роботи моделі були отримані, виходячи з вірнопозитивних (TP), вірнонегативних (TN), хибнопозитивних (FP) та хибнонегативних (FN) класифікованих пацієнтів. Оцінка результатів моделювання була виконана, використовуючи метрики чутливості (1) та специфічності (2):

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} \quad (1)$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN+FP} \quad (2)$$

Запис аудіо відбувався в положенні напівсидячи. У дослідженні взяло участь 220 осіб обох статей віком від 25 до 70 років. 57 випробуваних не мали хвороб легень та іншої хронічної патології та були віднесені до контрольної групи. Пацієнти із захворюваннями легень були поділені на 4 групи залежно від типу патології. Захворювання та кількість пацієнтів у кожній групі зазначено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Захворювання та кількість пацієнтів у кожній групі

Номер групи	Захворювання	Число піддослідних
1	Астма	44
2	Пневмонія	46
3	Хронічна обструктивна хвороба легень	39
4	Хронічна серцева недостатність	34
Усього		163

Джерело: розроблено авторами.

Після аналізу сигналів легень нейронною мережею було виконано порівняння отриманих результатів із попередньо встановленим класом захворювання. Згідно з порівнянням визначаються характеристики чутливості та специфічності методу. Чутливість або істинно позитивна пропорція відображала частку позитивних результатів, які правильно ідентифіковані як такі й розраховувалася як відношення чисельності пацієнтів, виявлених тестом, до хворих з уже встановленим діагнозом. Специфічність або істинно негативна пропорція відображала частку негативних результатів, які правильно ідентифіковані як такі, і була розрахована як відношення числа здорових пацієнтів, виявлених тестів до справжньої кількості здорових пацієнтів [14].

Запропонована архітектура штучної нейронної мережі складається з трьох основних частин. Згорткова нейронна мережа (CNN) і двонаправлена мережа LSTM (CNN + BiLSTM) були розроблені для процесів навчання та класифікації для виокремлення характеристик як з просторової, так і з часової області сигналів. Отримані просторові та часові характеристики опрацьованого сигналу аускультації легень передаються до лінійного шару з функцією активації Softmax для отримання розподілу ймовірностей належності сигналу до певного класу. Структура запропонованої архітектури наведена на рис. 2.

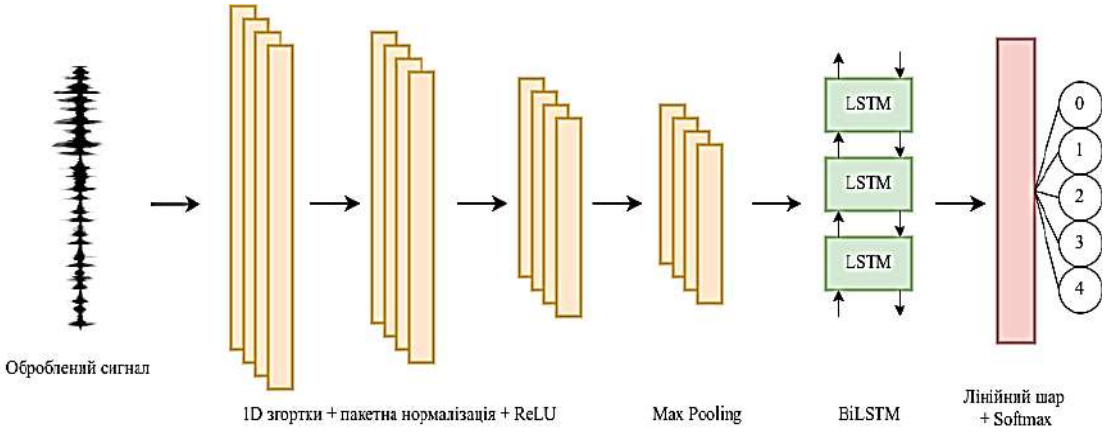


Рис. 2. Архітектура запропонованої моделі

Для обробки попередньо опрацьованого та стандартизованого сигналу було створено згорткові шари, що включають у себе одновимірні згортки (1D CNN), пакетну нормалізацію, застосування функції активації випрямленого лінійного блоку (ReLU), а також шар MaxPooling для зменшення розмірності даних та отримання характеристик вищого порядку. Для зменшення обчислювальної складності моделі та часу тренування використовуються частини сигналу завдовжки 5 с. Таким чином, на вхід першого згорткового шару очікуються дані розмірністю (1.20000), з кількістю каналів сигналу та кількістю амплітудних значень відповідно. Під час експериментів для одновимірних згорток було обрано наступні параметри: розмір ядра 64, кількість фільтрів 32 та з кроком 1. При проведенні експериментів також було помічено, що використання Неініціалізації вагів одновимірних згорток покращило процес збіжності моделі.

LSTM (Long Short-Time Memory) шари використовуються як блоки в рекурентних нейронних мережах та дозволяють опрацьовувати послідовні характеристики як у прямому (unidirectional), так і у зворотному (bidirectional) напрямах. У представленому дослідженні було використано 2 двонаправлених LSTM шари зі 100 прихованими блоками в кожному. Отримані характеристики після проходження через LSTM шари направляються в лінійний шар для класифікації. У процесі експериментів для запобігання перенавчання моделі між BiLSTM та лінійним шаром було додано прошарок Dropout із вірогідністю 0,2. Для вирішення проблеми незбалансованості класів також було застосовано модифікацію вагів класів на етапі обчислення функції втрат. Так, для кожного з класів була обрана вага, обернено пропорційна частоті присутності цього класу у вибірці, що розраховується за формулою:

$$\omega_c = 1 - \frac{N_c}{N_d}, \tag{3}$$

де N_c – кількість входжень класу до вибірки; N_d – загальна кількість входжень класів захворювань.

Тренування відбувалося за схемою 10-кратної перехресної перевірки, щоб забезпечити якомога більше даних у навчальній моделі та охопити весь набір даних під час процесу прогнозування. Для оцінки розпізнавання захворювання за допомогою CNN і LSTM окремо або їх комбінації було використано декілька метрик: точність, чутливість, специфічність та F-міра. Проміжні результати наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Проміжні результати 10-кратної перехресної перевірки із використанням запропонованої моделі

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Точність	0,9844	0,972	0,9813	0,9782	0,9906	0,9844	0,9844	0,975	0,987	0,987	0,982	0,0058
Чутливість	1	0,9688	1	1	1	0,9868	1	0,968	1	0,984	0,99	0,0132
Специфічність	0,9844	0,9767	0,9805	0,9765	0,9883	0,9884	0,9844	0,996	0,988	0,988	0,985	0,0059
F-міра	0,9845	0,9723	0,9814	0,9782	0,9907	0,9845	0,9845	0,975	0,987	0,987	0,982	0,0057

Джерело: розроблено авторами

За отриманими результатами бачимо, що стандартне відхилення є незначним, у той час як середні показники обраних метрик наближаються до 1, що вказує на наявну генералізацію моделі та адаптованість до нових даних, а також на відносно високу якість отриманого класифікатора. Окрім цього, було виконано порівняння результатів запропонованої моделі з уже відомими апробованими рішеннями за наявними метриками. Результати порівняння наведені на рис. 3.

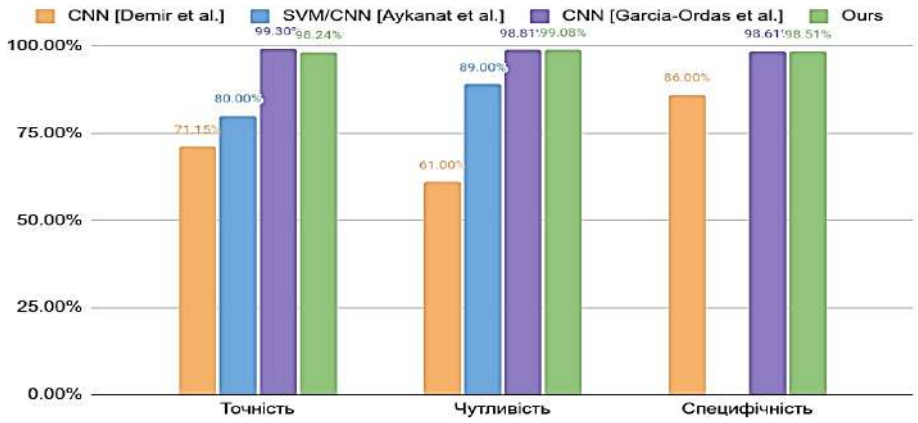


Рис. 3. Порівняльний аналіз запропонованого методу та наявних досліджень

За проведеним аналізом можна зробити висновки щодо доцільності використання обраної архітектури та високих можливостей у використанні CNN та BiLSTM для задачі класифікації медичних аудіоданих. Модель показала найкращі результати за показником чутливості серед порівнюваних і результати, близькі до найкращих за точністю та специфічністю класифікації. Враховуючи, що запропонована авторами модель не застосовує аугментацію чутливих медичних даних на відміну від суміжної з високими показниками, сформувати експертну оцінку її використання та впровадження в медичну практику буде значно простіше.

Виклад основного матеріалу. У цьому дослідженні було проведено вивчення особливостей використання моделей глибокого навчання, що проілюстровано комбінацією нейронних мереж CNN та BiLSTM для виявлення захворювань легень. Розроблена модель досягла високого рівня продуктивності, чутливість методу склала 99 %. Кількість встановлених правильно діагнозів у кожній групі зазначено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Чисельність встановлених правильно діагнозів у кожній групі

Номер групи	Захворювання	Число пацієнтів із правильно встановленим діагнозом
1	Астма	44
2	Пневмонія	44
3	Хронічна обструктивна хвороба легень	38
4	Хронічна серцева недостатність	33
Усього		159

Примітка: Кількість негативних результатів, які правильно ідентифіковані як такі, становила 56 %, а специфічність методу – 98,5 %. Найкращі результати були досягнуті в діагностиці астми.

Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, пропоноване авторами дослідження забезпечує досить точне розпізнавання досліджуваних хвороб легень за звуками легень. На відміну від використання традиційного стетоскопа та діагностики захворювань вручну, звуки легень, записані в аудіоформаті, у поєднанні з прогностичною моделлю глибокого навчання має значний потенціал для скорочення кількості діагностичних помилок у виявленні патології дихальної системи. З вищенаведеного випливає, що на багато клінічних рішень можна позитивно вплинути, щоб запобігти подальшому розвитку хвороби. З іншого боку, з клінічного погляду авторами рекомендується побудувати модель, що буде знатна виявляти невеликі варіації сигналів у різних пацієнтів [15].

Систематичний огляд 2021 року був проведений шляхом пошуку у трьох базах даних PubMed, Scopus та Web of Science з 1 листопада 2019 р. по 20 липня 2020 р. на основі стратегії пошуку [16]. Усього було вилучено 168 статей, 37 статей були обрані як дослідження за допомогою критеріїв включення та виключення. Автори дійшли висновку, що застосування глибокого навчання в галузі обробки радіологічних зображень пацієнтів з підозрою на COVID-19 знижує кількість хибнопозитивних та негативних помилок при виявленні та діагностиці цього захворювання та пропонує унікальну можливість надавати пацієнтам швидкі, дешеві та безпечні діагностичні послуги [16].

Широта проблем, які може допомогти вирішити машинне навчання, величезна і, ймовірно, швидко зросте в областях виявлення, характеристики та прогнозування захворювань, а також прийняття індивідуальних рішень щодо лікування. Радіологи, що першими прийняли цю нову технологію, повинні бути обережними споживачами та критично ставитися до нових досягнень, щоб гарантувати, що вони є безпечними та ефективними інструментами у клінічній практиці. Інтеграція машинного навчання в повсякденний робочий процес може розширити можливості та зробити рентгенологів більш ефективними, більш зосередженими на діагностиці та завданнях вищого порядку, а також більш здатними задовольняти потреби напрямних лікарів і пацієнтів [17].

Методи машинного навчання активно використовувалися і в інших галузях медицини. Моделі глибокого навчання застосовувалися для автоматичного сегментування органів, схильних до ризику, при променевій терапії раку легень, стратифікації пацієнтів відповідно до ризику місцевого та віддаленого рецидиву та визначення пацієнтів-кандидатів на молекулярну таргетну терапію та імунотерапію. Більше того, радіоміка також успішно застосовується для прогнозування побічних ефектів, таких як пневмоніт, викликаного променевою та імунотерапією, та диференціації ушкодження легень від рецидиву. Радіоміка також може розкрити потенціал подальшого використання КТ з конічним променем, отриманої для керування зображенням лікування, чотиривимірною комп'ютерною томографією та даними обсягу дози з планів променевої терапії. Очікується, що радіоміка дедалі більше впливатиме на клінічну практику лікування пухлин легень, оптимізуючи наскрізний ланцюг діагностика – лікування – наступне спостереження [18].

Складність застосування ШІ у хірургії наголошується на висновку про те, що лише 9,8 % медичних пристроїв проходять випробування на людях протягом 10 років, і що участь реального клініциста під час розробки нових пристроїв значно підвищила шанси на застосування технологій у клінічній практиці. Для просування цієї технології необхідно зібрати великі обсяги відеороликів, у яких відображені хірургічні процедури [19]. Для цього потрібні сотні, якщо не тисячі повністю анотованих відеороликів по кожному конкретному типу операції, які можна використовувати та розповсюджувати в дослідницькій спільноті. Щоб відповідати цій вимозі, збір, підготовка та анотування даних мають стати частиною майбутньої медичної практики. Це також потребує тісної та міждисциплінарної співпраці з боку ШІ та медичних спільнот. Сучасні хірурги повинні розбиратися в основах штучного інтелекту, щоб краще використовувати цю область у хірургічній практиці. Молоді академічні хірурги повинні розглянути можливість отримання досвіду у цій галузі у формі програм магістратури або докторантури, на відміну від традиційних областей навчання, таких як молекулярна біологія, генетика та імунологія [20].

У наявній літературі окреме місце відводиться позитивним та негативним аспектам впровадження технологій штучного інтелекту в медицині. Основним обмеженням обчислювальних підходів є нестача досить великих наборів даних на навчання нейронних мереж. Подолання цього вимагатиме великомасштабної співпраці, такої, як нещодавно створений Консорціум візуалізації з відкритим вихідним кодом, співпраця між академічними колами та промисловістю для розробки візуалізуючих біомаркерів для захворювання легень із використанням штучного інтелекту. Переваги спільного використання та повторного використання даних про окремих учасників клінічних випробувань набувають дедалі більшого визнання, але потрібні надійні міжнародно визнані етичні та правові рамки для ширшого прийняття цих технологій [11]. Важливим аспектом плюсів застосування ШІ є обчислювальні можливості сучасних комп'ютерів. Величезний обсяг цифрових медичних даних, таких як зображення високої роздільної здатності, геномні дослідження, безперервний моніторинг біосенсорів та електронні медичні записи, становить приблизно 150 екзабайт (екзабайти – це один квінтильйон (1018) байт або один мільярд гігабайт) тільки в США, і щороку він зростає на 48 % [21]. Комп'ютери можуть легко аналізувати мільйони і навіть мільярди точок даних, дозволяючи штучному інтелекту (ШІ) і таким методам, як машинне навчання та глибоке навчання, змінювати ситуацію в сучасній охороні здоров'я [22].

Прийняття рішень на основі даних у легеневій медицині може бути посилено шляхом впровадження алгоритмів машинного навчання та глибокого навчання в повсякденну практику. Величезні обсяги клінічних, фізіологічних, епідеміологічних і генетичних даних уже аналізуються з використанням алгоритмів, які служать клініцистам у

формі керованих, інтерпретованих та дієвих знань, що розширюють можливості прийняття рішень. Крім того, аналіз даних на основі ШІ забезпечує більш точне прогнозне моделювання та закладає основу для дійсно точної медицини, що базується на даних, і яка знизить залежність від людських ресурсів. У міру розвитку обчислювальної потужності алгоритми сприйматимуть і осмислено оброблятимуть масивні набори даних навіть швидше, точніше і менш трудомісткі, ніж людський розум. З розвитком технологій і майбутні лікарі неминуче впроваджуватимуть ШІ у клінічну практику. З огляду на те, як ШІ сприятливо впливає інші області, майбутнє вже тут [22].

Таких висновків дійшли й автори іншого дослідження, зазначивши, що ШІ покращив клінічну діагностику та ефективність прийняття рішень у кількох галузях медичних завдань [23]. Клініцистам необхідно буде адаптуватися до своєї нової ролі інтеграторів інформації, а система медичної освіти має надати їм інструменти та методи для цього. Також було розглянуто питання про заміну ШІ лікарів та медичного персоналу. Твердження про те, що лікарів незабаром замінить ШІ, насправді перебільшені, але філософські проблеми, висвітлені вище, свідчать про більш прямий шкідливий вплив цих технологій, починаючи від вилучення кількісних даних і виключення інформації від першої особи до визначення клінічних даних [24; 25].

Машинне навчання – це континуум злиття інформатики та статистики, і він не тільки може являти собою наступну хвилю в розвитку сучасної охорони здоров'я, він вже з'явився та використовується в реальних додатках з великим успіхом у багатьох галузях медицини. Перехід до великомасштабних додатків та інтеграція із загальною клінічною практикою неминуча, і питання залишається лише в часі. Машинне навчання та штучний інтелект у майбутньому може створювати комп'ютеризованих помічників лікаря, а не автономних «електронних лікарів», проте можливість створення лікарні «з підтримкою глибокого навчання» не є повністю спекулятивною [26]. Також автори дослідження [26] наголосили, що вони виступають за активну розробку та інтеграцію баз даних для полегшення цього процесу. У багатьох випадках машинне навчання допомагає приймати клінічні рішення, але не повністю замінює лікаря. Людські помилки в медицині пов'язані з великими фінансовими втратами, і багато з них можна запобігти за допомогою штучного інтелекту та машинного навчання. ШІ особливо корисний за відсутності переконливих доказів прийняття рішень. У галузі респіраторної медицини було опубліковано кілька досліджень з перспективними результатами. Вони в основному зосереджені на обструктивних станах і легеневого фіброзу з погляду діагностики, стадії, загострення та виживання [27; 28].

Таким чином, штучний інтелект поступово змінює медичну практику. Завдяки прогресу у зборі оцифрованих даних, машинному навчанню та обчислювальній інфраструктурі, додатки штучного інтелекту розширюються у сферах, які раніше вважалися сферою компетенції фахівців.

Висновки. У цьому дослідженні авторами проводилося вивчення можливості глибокого навчання розпізнавати легеневі захворювання за звуковими сигналами легких. Модель глибокого навчання, що заснована на згорткових нейронних мережах (CNN) та двонаправленої довгострокової короткострокової пам'яті (LSTM), була використана з метою класифікації звуків легенів та на її основі виявити наявність патології легеневої системи. Розроблена авторами модель досягла найвищого рівня продуктивності. Чутливість та специфічність методу склали 99 та 98,5 % відповідно. Ці результати разом із висновками робіт інших авторів продовжують шлях до запровадження глибокого навчання в клінічних умовах.

Важливим аспектом залишається зосередження на подальшій роботі зі збільшеним розміром набору даних, щоб включати більше параметрів і ширший спектр захворювань, таких як COVID-19. Це підвищить надійність запропонованої моделі. Хоча запропонована авторами діагностична модель забезпечує високі показники ефективності, її можна

покращити, змінивши як методи попередньої обробки, так і структуру навчання. Слід зазначити, що сучасні методи машинного навчання та технології Big Data дозволяють ефективніше накопичувати, візуалізувати та аналізувати дані, отримані під час обстеження пацієнта, що також позитивно впливає на подальше ведення пацієнта. Важливу роль у впровадженні ШІ у клінічну практику відіграє залучення лікарів у цей процес, а також еволюція системи охорони здоров'я.

Таким чином, у ході дослідження виникли нові питання та проблеми, які потребують свого вирішення. Ця робота демонструє позитивні результати машинного навчання на обмеженій вибірці. Висновки великомасштабних досліджень за участю більшої кількості пацієнтів для кожного із захворювань, а також масштабнішої контрольної групи дадуть ще більш точний результат. Також необхідно продовжити роботу з розробки та вдосконалення методики, впровадження її в практичну галузь: майбутні дослідження та технології навчання ШІ мають бути зосереджені на повішенні продуктивності та сили штучного інтелекту.

Список використаних джерел

1. Labaki W. W. Chronic respiratory diseases: a global view / W. W. Labaki, M. K. Han // Lancet Respiratory Medicine. – 2020. – Vol. 8, No. 6. – Pp. 531-533.

2. Cho S. J. Aging and Lung Disease / S. J. Cho, H. W. Stout-Delgado // Annual Review of Physiology. – 2020. – Vol. 82. – Pp. 433-459.

3. Greenes R. A. Medical informatics. An emerging academic discipline and institutional priority / R. A. Greenes, E. H. Shortliffe // JAMA. – 1990. – Vol. 263, No. 8. – Pp. 1114-1120.

4. Reiner B. I. Improving healthcare delivery through patient informatics and quality centric data / B. I. Reiner // Journal of Digital Imaging. – 2011. – Vol. 24, No. 2. – Pp. 177-178.

5. Kaul V. History of artificial intelligence in medicine / V. Kaul, S. Enslin, S. A. Gross // Gastrointestinal Endoscopy. – 2020. – Vol. 92, No. 4. – Pp. 807-812.

6. Aykanat M. Classification of lung sounds using convolutional neural networks / M. Aykanat, Ö. Kılıç, B. Kurt // EURASIP Journal on Image and Video Processing. – 2017. – Vol. 65, No. 1. – Pp. 65-69.

7. Bardou D. Lung sounds classification using convolutional neural networks / D. Bardou, K. Zhang, S. M. Ahmad // Artificial Intelligence in Medicine. – 2018. – Vol. 88, No. 1. – Pp. 58-69.

8. Detecting Respiratory Pathologies Using Convolutional Neural Networks and Variational Autoencoders for Unbalancing Data / M. T. García-Ordás, J. A. Benítez-Andrades, I. García-Rodríguez, C. Benavides, H. Alaiz-Moretón // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 4. – Art. 1214.

9. Özçelik N. Artificial intelligence applications in pulmonology and its advantages during the pandemic period / N. Özçelik, İ. Selimoğlu // Tuberk Toraks. – 2021. – Vol. 69, No. 3. – Pp. 380-386.

10. Mekov E. Artificial intelligence and machine learning in respiratory medicine / E. Mekov, M. Miravitlles, R. Petkov // Expert Review of Respiratory Medicine. – 2020. – Vol. 14, No. 6. – Pp. 559-564.

11. Applications of artificial intelligence and machine learning in respiratory medicine / S. Gonem, W. Janssens, N. Das, M. Topalovic // Thorax. – 2020. – Vol. 75, No. 8. – Pp. 695-701.

12. Emmanouilidou D. Characterization of noise contaminations in lung sound recordings / D. Emmanouilidou, M. Elhilal // On Conference proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – Osaka: Osaka International Convention Center, 2013. – Pp. 2551-2554.

13. A wavelet-based ECG delineator: evaluation on standard databases / J. P. Martínez, R. Almeida, S. Olmos, A. P. Rocha, P. Laguna // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2004. – Vol. 51, No. 4. – Pp. 570-581.

14. Understanding and using sensitivity, specificity and predictive values / R. Parikh, A. Mathai, S. Parikh, G. Chandra Sekhar, R. Thomas // Indian Journal of Ophthalmology. – 2008. – Vol. 56, No. 1. – Pp. 45-50.

15. CNN-based transfer learning-BiLSTM network: A novel approach for COVID-19 infection detection / M. F. Aslan, M. F. Unlersen, K. Sabanci, A. Durdu // Applied Soft Computing. – 2021. – Vol. 98. – Art. 106912.

16. Ghaderzadeh M. Deep Learning in the Detection and Diagnosis of COVID-19 Using Radiology Modalities: A Systematic Review / M. Ghaderzadeh, F. Asadi // Journal of Healthcare Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – Art. 6677314.

17. Machine Learning and Deep Neural Networks in Thoracic and Cardiovascular Imaging / T. A. Retson, A. H. Besser, S. Sall, D. Golden, A. Hsiao // Journal of Thoracic Imaging. – 2019. – Vol. 34, No. 3. – Pp. 192-201.

18. Radiomics and deep learning in lung cancer / M. Avanzo, J. Stancanello, G. Pirrone, G. Sartor // Strahlentherapie und Onkologie. – 2020. – Vol. 196, No. 10. – Pp. 879-887.

19. Systematic review of machine learning for diagnosis and prognosis in dermatology / K. Thomsen, L. Iversen, T. L. Titlestad, O. Winther // Journal of Dermatological Treatment. – 2020. – Vol. 31, No. 5. – Pp. 496-510.

20. Artificial Intelligence Surgery: How Do We Get to Autonomous Actions in Surgery? / A. A. Gumbs, I. Frigerio, G. Spolverato, R. Croner, A. Illanes, E. Chouillard, E. Elyan // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 16. – Art. 5526.

21. Stanford Medicine. Harnessing the Power of Data in Health. Stanford Medicine [Electronic resource]. – 2017. – Accessed mode: https://med.stanford.edu/content/dam/sm/sm-news/documents/StanfordMedicineHealthTrendsWhitePaper2017.pdf.

22. Khemasuwan D. Artificial intelligence in pulmonary medicine: computer vision, predictive model and COVID-19 / D. Khemasuwan, J. S. Sorensen, H. G. Colt // European Respiratory Review. – 2020. – Vol. 29, No. 157. – Art. 200181.

23. Yu K.-H. Artificial intelligence in healthcare / K.-H. Yu, A. L. Beam, I. S. Kohane // Nature Biomedical Engineering. – 2018. – Vol. 2, No. 10. – Pp. 719-731.

24. Chin-Yee B. Three Problems with Big Data and Artificial Intelligence in Medicine / B. Chin-Yee, R. Upshur // Perspectives in Biology and Medicine. – 2019. – Vol. 62, No. 2. – Pp. 237-256.

25. Naylor C. D. On the Prospects for a (Deep) Learning Health Care System / C. D. Naylor // JAMA. – 2018. – Vol. 320, No. 11. – Pp. 1099-1100.

26. eDoctor: Machine learning and the future of medicine / G. S. Handelman, H. K. Kok, R. V. Chandra, A. H. Razavi, M. J. Lee, H. Asadi // Journal of Internal Medicine. – 2018. – Vol. 284, No. 6. – Pp. 603-619.

27. Upshur R. E. If not evidence, then what? Or does medicine really need a base? / R. E. Upshur // Journal of Evaluation in Clinical Practice. – 2002. – Vol. 8, No. 2. – Pp. 113-119.

28. Effect of Data Augmentation and Lung Mask Segmentation for Automated Chest Radiograph Interpretation of Some Lung Diseases / P. Gang, W. Zeng, Yu. Gordienko, Yu. Kochura, O. Alienin, O. Rokovyi, S. Stirenko // Neural Information Processing. ICONIP 2019. Communications in Computer and Information Science / Edited by T. Gedeon, K. Wong, M. Lee. – Cham: Springer, 2019.

References

1. Labaki, W.W., & Han, M.K. (2020). Chronic respiratory diseases: a global view. *Lancet Respiratory Medicine*, 8(6), 531-533.

2. Cho, S.J., & Stout-Delgado, H.W. (2020). Aging and Lung Disease. *Annual Review of Physiology*, 82, 433-459.

3. Greenes, R.A., & Shortliffe, E.H. (1990). Medical informatics. An emerging academic discipline and institutional priority. *JAMA*, 263(8), 1114-1120.

4. Reiner, B.I. (2011). Improving healthcare delivery through patient informatics and quality centric data. *Journal of Digital Imaging*, 24(2), 177-178.

5. Kaul, V., Enslin, S., & Gross, S.A. (2020). History of artificial intelligence in medicine. *Gastrointestinal Endoscopy*, 92(4), 807-812.

6. Aykanat, M., Kılıç, Ö., & Kurt, B. (2017). Classification of lung sounds using convolutional neural networks. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 65(2017), 65-69.

7. Bardou, D., Zhang, K., & Ahmad, S.M. (2018). Lung sounds classification using convolutional neural networks. *Artificial Intelligence in Medicine, 88*(1), 58-69.

8. García-Ordás, M.T., Benítez-Andrades, J.A., García-Rodríguez, I., Benavides, C., & Alaiz-Moretón, H. (2020). Detecting Respiratory Pathologies Using Convolutional Neural Networks and Variational Autoencoders for Unbalancing Data. *Sensors*, *20*(4), 1214.

9. Özçelik, N., & Selimoğlu, İ. (2021). Artificial intelligence applications in pulmonology and its advantages during the pandemic period. *Tuberk Toraks*, *69*(3), 380-386.

10. Mekov, E., Miravitlles, M., & Petkov, R. (2020). Artificial intelligence and machine learning in respiratory medicine. *Expert Review of Respiratory Medicine*, 14(6), 559-564.

11. Gonem, S., Janssens, W., Das, N., & Topalovic, M. (2020). Applications of artificial intelligence and machine learning in respiratory medicine. *Thorax*, *75*(8), 695-701.

12. Emmanouilidou, D., & Elhilal, M. (2013). Characterization of noise contaminations in lung sound recordings. In: *On Conference proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 2551-2554). Osaka: Osaka International Convention Center.

13. Martínez, J.P., Almeida, R., Olmos, S., Rocha, A.P., & Laguna, P. (2004). A wavelet-based ECG delineator: evaluation on standard databases. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(4), 570-581

14. Parikh, R., Mathai, A., Parikh, S., Chandra Sekhar, G., & Thomas, R. (2008). Understanding and using sensitivity, specificity and predictive values. *Indian Journal of Ophthalmology*, 56(1), 45-50.

15. Aslan, M.F., Unlersen, M.F., Sabanci, K., & Durdu, A. (2021). CNN-based transfer learning-BiLSTM network: A novel approach for COVID-19 infection detection. *Applied Soft Computing*, 98, 106912.

16. Ghaderzadeh, M., & Asadi, F. (2021). Deep Learning in the Detection and Diagnosis of COVID-19 Using Radiology Modalities: A Systematic Review. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021, 6677314.

17. Retson, T.A., Besser, A.H., Sall, S., Golden, D., & Hsiao, A. (2019). Machine Learning and Deep Neural Networks in Thoracic and Cardiovascular Imaging. *Journal of Thoracic Imaging*, 34(3), 192-201.

18. Avanzo, M., Stancanello, J., Pirrone, G., & Sartor, G. (2020). Radiomics and deep learning in lung cancer. *Strahlentherapie und Onkologie*, 196(10), 879-887.

19. Thomsen, K., Iversen, L., Titlestad, T.L., & Winther, O. (2020). Systematic review of machine learning for diagnosis and prognosis in dermatology. *Journal of Dermatological Treatment*, 31(5), 496-510.

20. Gumbs, A.A., Frigerio, I., Spolverato, G., Croner, R., Illanes, A., Chouillard, E., & Elyan, E. (2021). Artificial Intelligence Surgery: How Do We Get to Autonomous Actions in Surgery? *Sensors*, 21(16), 5526.

21. Stanford Medicine. (2017). https://med.stanford.edu/content/dam/sm/sm-news/documents/StanfordMedicineHealthTrendsWhitePaper2017.pdf.

22. Khemasuwan, D., Sorensen, J.S., & Colt, H.G. (2020). Artificial intelligence in pulmonary medicine: computer vision, predictive model and COVID-19. *European Respiratory Review*, *29*(157), 200181.

23. Yu, K.-H., Beam, A.L., & Kohane, I.S. (2018). Artificial intelligence in healthcare. *Nature Biomedical Engineering*, 2(10), 719-731.

24. Chin-Yee, B., & Upshur, R. (2019). Three Problems with Big Data and Artificial Intelligence in Medicine. *Perspectives in Biology and Medicine*, 62(2), 237-256.

25. Naylor, C.D. (2018). On the Prospects for a (Deep) Learning Health Care System. *JAMA*, 320(11), 1099-1100.

26. Handelman, G.S., Kok, H.K., Chandra, R.V., Razavi, A.H., Lee, M.J., & Asadi, H. (2018). eDoctor: Machine learning and the future of medicine. *Journal of Internal Medicine*, *284*(6), 603-619.

27. Upshur, R.E. (2002). If not evidence, then what? Or does medicine really need a base? *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, *8*(2), 113-119.

28. Gang, P., Zeng, W., Gordienko, Yu., Kochura, Yu., Alienin, O., Rokovyi, O., & Stirenko, S. (2019). Effect of Data Augmentation and Lung Mask Segmentation for Automated Chest Radiograph Interpretation of Some Lung Diseases. In: T. Gedeon, K. Wong, M. Lee (Eds.), *Neural Information Processing. ICONIP 2019. Communications in Computer and Information Science*. Cham: Springer.

Отримано 06.05.2022

UDC 611.08(611.24)

Denis Panaskin[1], Yelyzaveta Bilokon[2], Dmytro Babko[3]

[1]Master, Department of Computer Science
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: d_panaskin9239-1@academics.org.pl. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1966-2165

[2]Master, Faculty of Information Technologies
Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)
E-mail: yelyz_bilokon@uni.com.nl. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6673-5910

[3]Master, Faculty of Informatics and Computer Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: d.babko@sc-community.be. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7510-3552

MACHINE LEARNING FOR DIAGNOSIS OF DISEASES OF PULMONARY SYSTEM

The relevance of the presented article is due to the fact that, although there is data on the effectiveness of using artificial intelligence (AI) for diagnosis of diseases, there is not enough information about the ability of deep learning, illustrated by deep convolutional neural networks and long-term units of short-term memory, in recognizing diseases of the respiratory system by sound signals of the lungs. A deep learning model based on convolutional neural networks and bidirectional long-term short-term memory was used to classify lung sounds and, on its basis, detect the presence of pulmonary system pathology.

The aim of the study was to compare the accuracy of a neural network diagnosis with a disease already established by doctors, and to test the current method of examination on healthy people.

In the course of the research, theoretical, diagnostic, empirical, methods of mathematical statistics and deep machine learning were used. The developed model reached a high level of productivity; the sensitivity of the method was 97.5 %.

The number of negative results that were correctly identified as such was 56 %, and the specificity of the method was 98.2 %. The best results have been achieved in the diagnosis of asthma. The study proposed by the authors provides a fairly accurate recognition of the studied lung diseases by the sounds of the lungs. In the course of the research, new questions and problems arose that needed their solution.

This study demonstrates good machine learning results in a limited sample. An important aspect remains to focus on further work with an increased dataset size to include more parameters and a wider range of diseases, such as COVID-19. Future AI research and learning technologies should focus on increasing the productivity and power of artificial intelligence.

Keywords: *medicine; Artificial Intelligence; lung disease; innovation; diagnostics.*

Fig.: 3. Table: 3. References: 28.

Панаскін Д., Білоконь Є., Бабко Д. Машинне навчання в діагностиці захворювань легеневої системи. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 76-87.

РОЗДІЛ ІІІ. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-88-95
УДК 665

Вікторія Воробйова[1], Георгій Васильєв[2], Інна Трус[3], Ольга Лінючева[4]

[1]кандидат 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
ResearcherID: J-5678-2017. **Scopus Author ID:** 55808771000

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: g.vasyliev@kpi.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4056-5551
ResearcherID: I-3058-2018. **Scopus Author ID:** 56105504500

[3]кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: inna.trus.m@gmail.com. **ORCID**: http://orcid.org/0000-0001-6368-6933
ResearcherID: I-3204-2017. **Scopus Author ID:** 56152219600

[4]доктор технічних наук, декан хіміко-технологічного факультету
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: ovlin13@ukr.net. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0003-4181-5946
ResearcherID: I-3755-2018. **Scopus Author ID:** 6506162803

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИРОДНИХ ІОННИХ РІДИН НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Нині розвиток сучасної хімічної технології та інженерії спрямований на концепцію екологізації та впровадження «зелених» технологій. Тому вивчення низькотемпературних евтектичних розчинників, що є дешевими та екологічними, набуває особливо важливого значення. У роботі синтезовано 6 розчинників при використанні холін хлориду, молочної кислоти, проліну, бетаїну, пропанолу та сечовини. Підтверджено формування водневих зв'язків між компонентами та визначені електрохімічні характеристики синтезованих іонних рідин. Проведені дослідження показали, що сечовина та молочна кислота є найбільш придатними сполуками для утворення НЕР.

Ключові слова: *низькотемпературні евтектичні розчинники; холін хлорид; ІЧ-спектроскопія; електричний опір.*

Рис.: 4. Табл.: 3. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. Концепція екологізації і впровадження «зелених» технологій є однією з ключових тенденцій у розвитку сучасної хімічної технології та інженерії.

Постановка проблеми. Основна частина хімічних технологій проходить за участю токсичних реагентів/прекурсорів, каталізаторів та є малоефективними і досить небезпечними для навколишнього середовища. Ця проблема набуває дедалі більшого значення не лише для України, а і для всього світу. Найбільш вдалим прикладом енерго- і ресурсозберігаючих технологій, що є безпечними для екології та ефективними для підприємств, є використання так званих біодеградабельних «зелених» технологій отримання речовин/матеріалів. Актуальним є використання «зелених» розчинників для різних галузей виробництва, а саме вилучення/синтезу органічних сполук, синтез наноматеріалів тощо, що дасть змогу отримати насправді екологічно безпечні речовини та матеріали/продукти на їх основі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР) (deep eutectic solvents, DES) є новітніми, дешевими та екологічними розчинниками, яким нині закордонними науковими товариствами приділяється особлива увага [1–4]. Рідкі системи іонної природи, які отримані в результаті змішування в певному співвідношенні деяких індивідуальних органічних і(або) неорганічних речовин, мають низку практично корисних властивостей, а саме: ширший спектр екстракційної здатності, термічна та хімічна стійкість, полярність, варіативність складових, відносно високі плинність і електропровідність (порівняно з органічними розчинниками), нелеткість, непальність. Причому сфери їх

© Воробйова В. І., Васильєв Г. С., Трус І. М., Лінючева О. В., 2022

потенційного застосування варіюються від промислових багатотонних виробництв, які можливо використовувати в різних галузях хімічної промисловості (фармацевтичних, косметичних та харчових виробництв) та хімічного матеріалознавства (отримання нанодисперсних та наноструктурованих матеріалів), у природоохоронній галузі [5; 6].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Нині зв'язок між складом і властивостями НЕР не описано адекватно і їх розробка здійснюється методом проб і помилок. Тому актуальним завданням сьогодення є вивчення фізико-хімічних властивостей нових НЕР.

Метою роботи є підбір реагентів для синтезу нових високоефективних низькотемпературних іонних розчинників та проведення досліджень щодо визначення електрохімічних характеристик синтезованих іонних рідин.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Приготування низькотемпературних евтектичних розчинників.

При проведенні експериментів використовувалися такі вихідні речовини (х.ч.): холін хлорид, сечовина, молочна кислота, ацетат натрію, пропандіол бетаїн та пролін.

Було приготовано 6 різних систем НЕР з різними співвідношеннями вище перерахованих компонентів (табл. 1).

Таблиця 1 – Склад розчинів НЕР

Скорочення	HBA	HBDs	Молярне співвідношення
НЕР -1	Холін хлорид	Сечовина	1:2
НЕР -2	Холін хлорид	Молочна кислота	1:2
НЕР -3	Ацетат натрію	Молочна кислота	1:2
НЕР -4	Холін хлорид	Пропандіол	1:2
НЕР -5	Пролін	Молочна кислота	1:2
НЕР -6	Бетаїн	Молочна кислота	1:2

Для приготування НЕР використовували здебільшого кристалічні речовини (за винятком молочної кислоти), що виступали донорами та акцепторами водневих зв'язків. Їх змішували в герметичних скляних колбах ємністю 100 мл у відповідних молярних співвідношеннях, виходячи з номера НЕР (табл. 1). Суміш поміщали на водяну баню та сплавляли при температурі 70-80 °С до утворення однорідної, прозорої рідини. Перемішування проводили безперервно за допомогою магнітної мішалки зі швидкістю обертанні 300 об/хв. Після утворення однорідної, прозорої рідини суміш охолоджували на повітрі до кімнатної температури.

Зняття поляризаційних кривих в розчинах низькотемпературних евтектичних розчинників.

У трьохелектродній комірці проводилися зняття поляризаційних кривих. Платинові електроди були поляризовані струмом у діапазоні потенціалів -1,2…+1,2 В/SSCE. Швидкість сканування становила 10 мВ/сек. Досліди проводили тричі для збіжності результатів.

Поляризаційні криві знімали для визначення електрохімічного вікна стійкості розчинів НЕР. Електрохімічне вікно визначає діапазон потенціалів, де електроліт не окислюється та не відновлюється. Будь-які електрохімічні процеси можна проводити в електроліті тільки в цьому діапазоні потенціалів. Методику циклічної вольтамперометрії використовували для визначення ширини електрохімічного вікна. Циклічні поляризаційні криві знімали в розчинах НЕР з додаванням води з масовими частками 1, 5, 10 та 25 %, щоб відстежити зміни властивостей низькотемпературних евтектичних розчинників при їх розведенні.

Визначення електропровідності розчинів НЕР.

Електропровідність розчину є ключовим фактором, що впливає на споживання електроенергії в електрохімічних процесах, а також визначає розсіювальну здатність електроліту при електрохімічному осадженні. У дослідженні за допомогою кондуктометричних вимірювань електрохімічного імпедансу вимірювали електропровідність розчину.

Пару платинових електродів розмірами 1×1 см щільно закріпили на відстані 1 см один від одного та помістили у скляний стакан об'ємом 40 $см^3$, що заповнений 20 $см^3$ досліджуваного розчину. Електричний сигнал частотою 1-100 кГц подавався між електродами від потенціостата Versa STAT 3 Гальваностат (AMETEK Scientific Instruments, США). Електричний опір визначали у високочастотній області (10 кГц). Значення електричного опору перераховували в одиницях провідності шляхом вимірювання опору стандартного розчину 0,2 М KCl у тій же комірці.

Для аналізу утворених низькотемпературних евтектичних розчинників проводили дослідження проб методом ІЧ-спектроскопії розчинів зі застосування ІЧ-спектрометра Фур'є SHIMADZU IRAffinity-1S з роздільною здатністю 4 $см^{-1}$.

Розчини НЕР, для яких проводилися дослідження методом ІЧ-спектроскопії, наведені в таблиці 2. Методом інфрачервоної спектроскопії було підтверджено успішність проведеного синтезу отримання іонної рідини та характеристики хімічних зв'язків.

Таблиця 2 – Провідність НЕР залежно від вмісту води

НЕР	Провідність к, См/м				
	Вміст води, % мас.				
	0	1	5	10	25
НЕР-1	0,094	0,193	0,725	1450	3412
НЕР-2	0,387	0,296	-	0,967	2071
НЕР-3	0,312	0,312	0,296	0,420	0,552
НЕР-4	0,1	0,13	0,16	0,22	0,34
НЕР-5	0,0034	0,0029	0,0046	0,0028	0,0047
НЕР-6	0,0025	0,0026	0,007	0,014	0,033

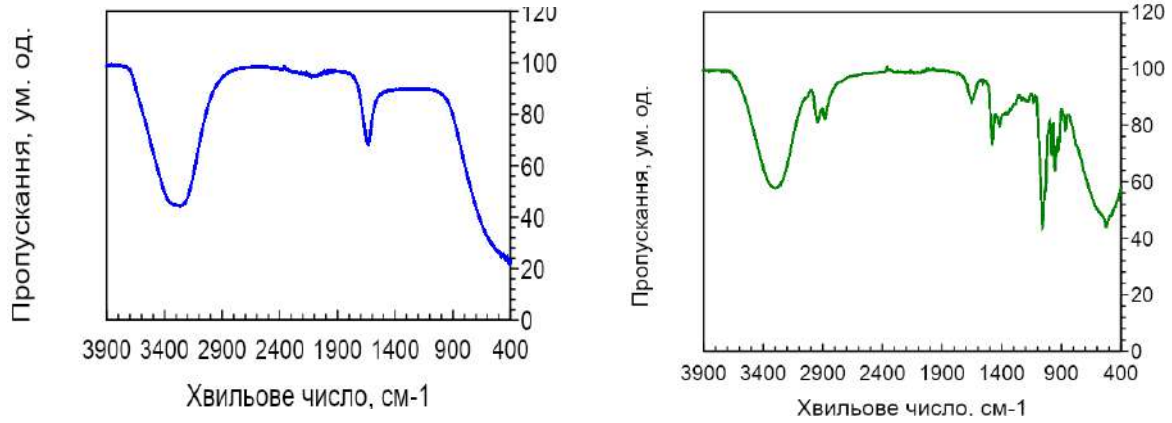
Як видно з таблиці 2, додавання води збільшує провідність усіх НЕР, але вплив води на них різний. Для системи холін хлорид/сечовина спостерігається найбільш значне підвищення провідності, майже в 36 тис. разів. Усі інші НЕР показали значно гірші значення: холін хлорид/молочна кислота приріст становив 5,2 тис. раза; ацетат натрію/молочна кислота – 1,8; холін хлорид – пропандіол – 3,4; пролін/молочна кислота – 1,3; бетаїн/молочна кислота – 13,2.

Оскільки дистильована вода має дуже низьку провідність, близько 10^{-4} См/м, тому вона не здатна збільшувати провідність при додаванні до розчину. Отже, підвищення провідності можна пояснити дисоціацією компонентів НЕР у воді, що означає, що зв'язок між компонентами НЕР слабкий, і принаймні один із компонентів розчиняється і дисоціює в доданій воді.

При дослідженні зразку НЕР-2 було встановлено, що основні піки, тобто найбільші зміни випромінювання, проявлялись при інтенсивності 1633,71 $см^{-1}$, що відповідає слабкій смузі зв'язку (R)-NH_2 і 3269,71 $см^{-1}$, що відповідає зв'язку С-Н (атом Карбону в sp^2 гібридизації) (рис. 1). Ці типи зв'язків і взаємодія молекул речовин відповідають складу відповідного синтезованого НЕР. Із даних спектроскопії можна зробити висновок, що під час утворення НЕР сильні зв'язки холіну ОН…Cl та СООН…СООН при формуванні НЕР ChCl та LA утворюють нові міцніші міжмолекулярні зв'язки СООН…Cl, це пояснює стабільність рідкої фази. Методом інфрачервоної спектроскопії при аналізі НЕР додатково підтверджено формування водневого зв'язку. Відповідно до літературних даних припускається, що в отриманому НЕР може бути присутнім декілька типів Н-зв'язків: ОН (LA)-Cl-, ОН (ChCl)-Cl- і LA-LA.

При дослідженні другого зразку НЕР-4 встановили, що основні піки лежать у діапазоні від 524,64 $см^{-1}$ до 1477,47 $см^{-1}$, це характеризує наявність у цьому синтезованому розчиннику С-С зв'язку (866,04 середня смуга інтенсивності), С = Н зв'язок (атом Карбону в sp^2 гібридизації, 921,97 $см^{-1}$, сильна смуга випромінювання), $С_{атом}$-Н зв'язок (атом Карбону

в ароматичному кільці, 952,84–981,77 $см^{-1}$), $(R)_2S = O$ зв'язок (1056,99 $см^{-1}$), $(R)_2SO_2$ зв'язок (1134,14 $см^{-1}$), C = H зв'язок (атом Карбону в sp^2 гібридизації, 1417,68 $см^{-1}$, сильна смуга випромінювання) та C = C зв'язок (атоми Карбону знаходяться в ароматичному кільці, 1477,47). Такі типи зв'язків та взаємодіє молекул речовин відповідають складу відповідного синтезованого НЕР.

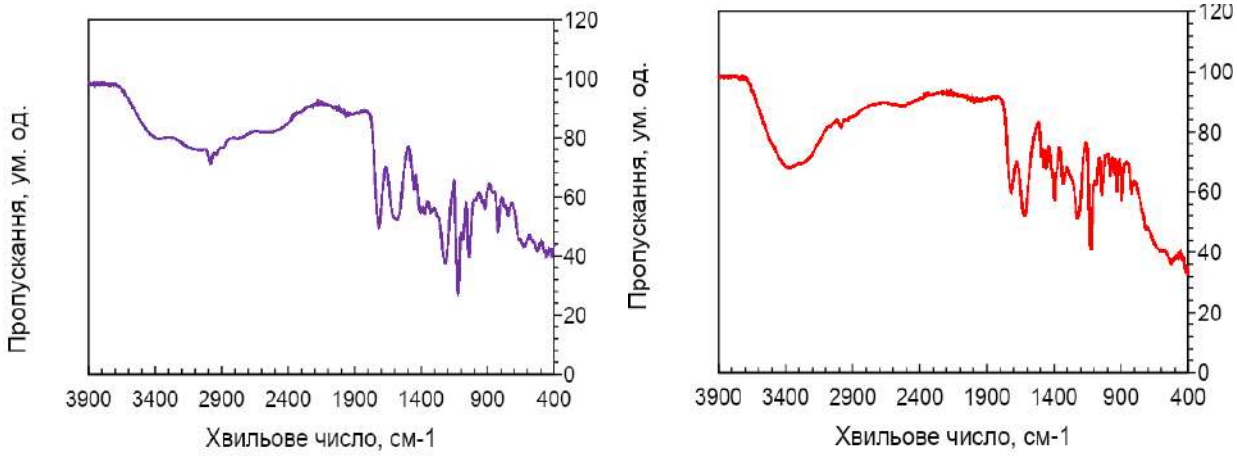


НЕР-2 *НЕР-4*

Рис. 1. Графік інфрачервоної спектроскопії

При дослідженні третього зразку синтезованого НЕР-5 встановили, що основні піки також лежать у широкому діапазоні випромінювання від 526,57 $см^{-1}$ до 2981,95 $см^{-1}$. Наявні такі переважні типи зв'язку: O-H (середня смуга випромінювання, 744,52 $см^{-1}$), C = CH (821,68 $см^{-1}$), C-O (сильна смуга випромінювання 1037,7 $см^{-1}$ – 1575,84 $см^{-1}$), C-H зв'язок (атом вуглецю в sp^3 гібридизації, 2981,95 $см^{-1}$). Ці типи зв'язків та взаємодії молекул речовин відповідають складу відповідного синтезованого НЕР (рис. 2).

Результати дослідження четвертого НЕР-6 показали, що інтенсивність випромінювання лежить у діапазоні 823,60–1490,97 $см^{-1}$. Наявні такі переважні типи зв'язку: C=CH зв'язок (823,60 $см^{-1}$), C = H зв'язок (атом вуглецю в sp^2 гібридизації, 894,97 $см^{-1}$), CH = CH зв'язок (979,84 $см^{-1}$), C-O (сильна смуга випромінювання 1043,49–1222,87 $см^{-1}$), $(R)ONO_2$ зв'язки (1332,81 $см^{-1}$ та 1396,46 $см^{-1}$) та C = C зв'язки (атоми Карбону знаходяться в ароматичному кільці, 1454,33 $см^{-1}$ та 1490,97 $см^{-1}$). Такі типи зв'язків та взаємодії молекул речовин відповідають складу відповідного синтезованого НЕР (рис. 2).



НЕР-5 *НЕР-6*

Рис. 2. Графік інфрачервоної спектроскопії

Згідно з отриманими даними було підтверджено природу утворення НЕР шляхом донорно-акцепторної взаємодії молекул вихідних сполук. Усі синтезовані НЕР володіють схожими піками, а отже, для них притаманна подібність у властивостях.

Результати досліджень електрохімічних характеристик низькотемпературних евтектичних розчинників.

Для застосування в деяких областях хімічної технології до НЕР додають 10-30 % води для поліпшення властивостей. Було визначено опір систем НЕР залежно від вмісту води. Результати показали, що здатність проводити електричний струм переважно пов'язана з типом HBD в НЕР (рис. 3).

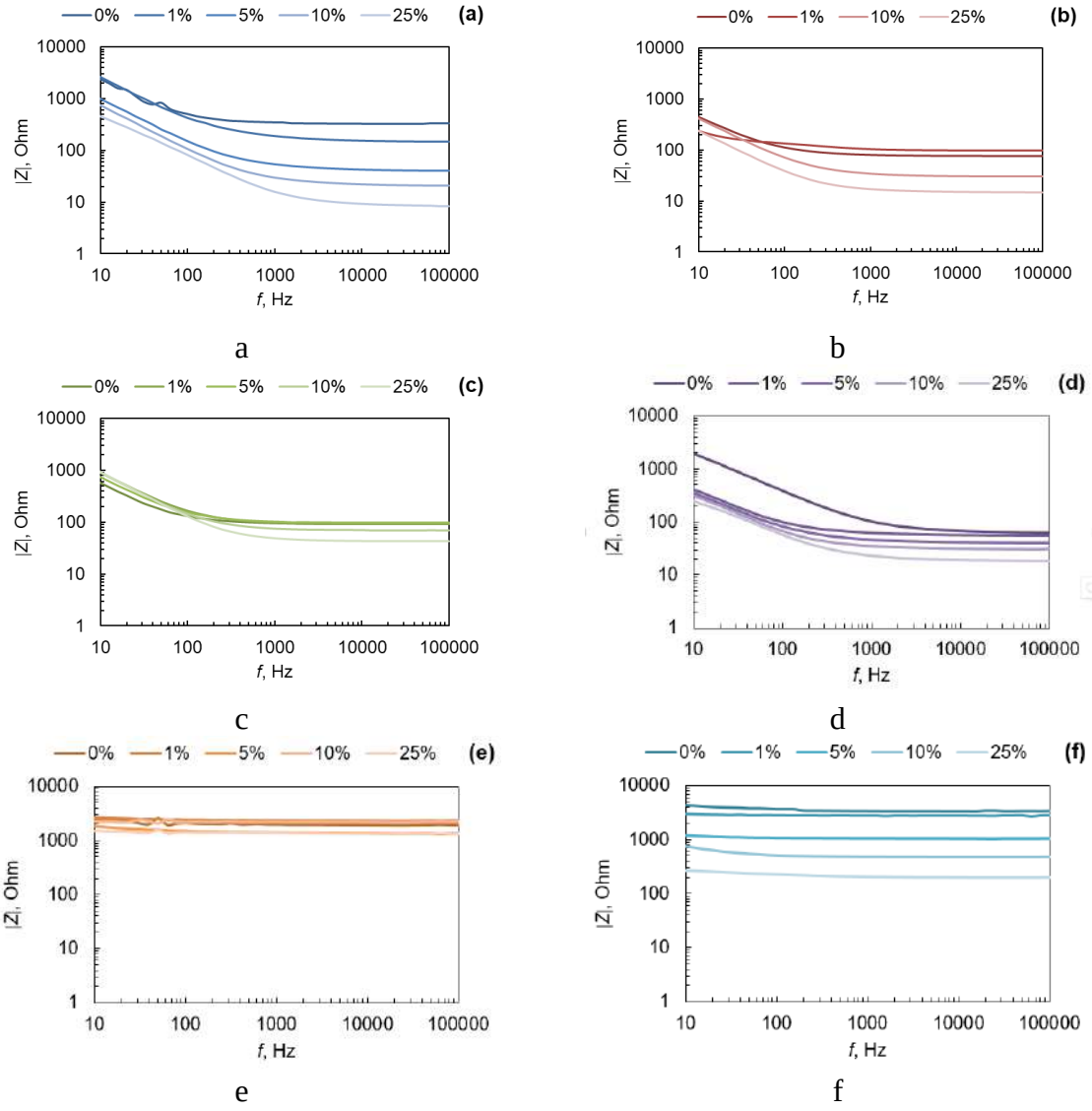


Рис. 3. Вплив вмісту води на електричний опір НЕР: (a) – хлорид холіну – сечовина; (b) – холін хлорид – молочна кислота; (c) – ацетат натрію – молочна кислота; (d) – холін хлорид – пропандіол; (e) – пролін – молочна кислота; (f) – бетаїн – молочна кислота

Дослідження вікон електрохімічної стабільності та вплив на його ширину вмісту води в системі наведені на рисунку 4.

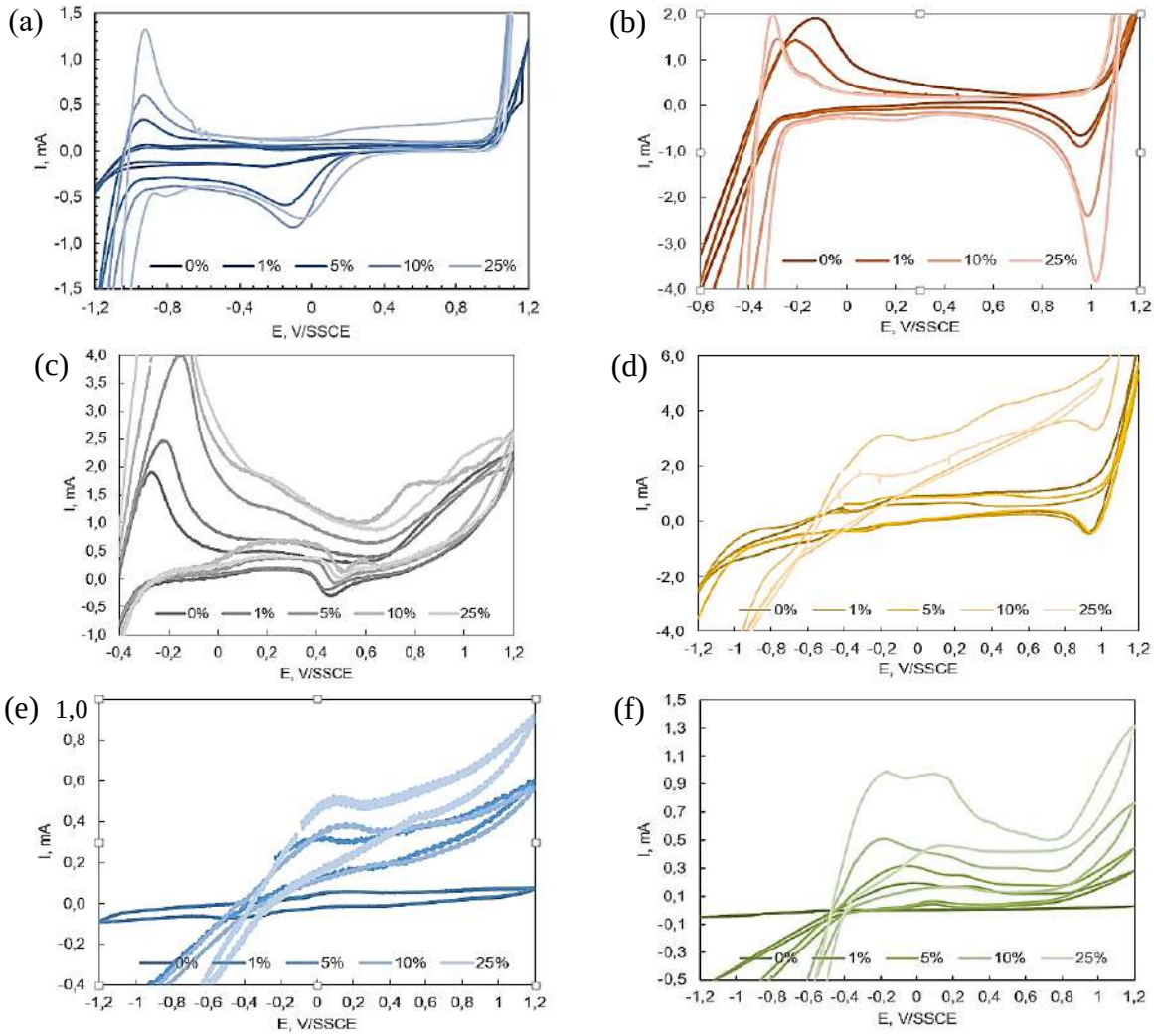


Рис. 4. Вплив вмісту води на вікно електрохімічної стабільності НЕР: (a) – хлорид холіну – сечовина; (b) – холіну хлорид – молочна кислота; (c) – ацетат натрію – молочна кислота; (d) – холін хлорид – пропандіол;(e) – пролін – молочна кислота; (f) – бетаїн – молочна кислота; ЕВ – електрохімічне вікно

Ширину вікна визначали в межах потенціалів, коли струм не перевищував 10-100 мк А залежно від провідності розчину. Вікна електрохімічної стабільності для всіх випробуваних розчинів наведені в таблиці 3. Чисті розчинники демонструють найширше вікно стабільності, наприклад, холін хлорид – сечовина ESW перевищує 2 В. Додавання води призводить до звуження електрохімічного вікна. Однак залежність ширини вікна від вмісту води залежить від системи.

Таблиця 3 – Вікна електрохімічної стабільності НЕР залежно від вмісту води в їхньому складі

НЕР	**Вікна електрохімічної стабільності, В**				
	Вміст води, % мас.				
	0	1	5	10	25
НЕР-1	2,01	1,98	0,86	0,81	0,7 0
НЕР-2	1,33	1,32	-	1,22	1,21
НЕР-3	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
НЕР-4	1,05	1,0	0,95	-	-
НЕР-5	2,4	2,4	-	-	-
НЕР-6	2,4	0,56	0,51	0,38	-

Таким чином, отримані результати досліджень показують, що більш придатними сполуками для утворення НЕР є сечовина й молочна кислота. Дослідження провідності та вікна електрохімічної стабільності НЕР показали вищу стабільність НЕР на основі молочної кислоти якості акцептора електронів. Додавання 25% мас. води збільшує провідність з 0,39 до 2,07 См/м, а ESW змінюється з 1,33 до 1,21 В.

Висновки. Синтезовано 6 низькотемпературних іонних розчинників при використанні холін хлориду, молочної кислоти, проліну, бетаїну, пропанолу та сечовини. Методом ІЧ-спектроскопії підтверджено формування водневих зв'язків між компонентами іонних рідин. Визначені електрохімічні характеристики синтезованих іонних рідин. НЕР на основі молочної кислоти є найбільш електропровідними та проявляють найбільшу електрохімічну стабільність. Додавання води в кількості 1…25 % призводить до зменшення ширини електрохімічного вікна з 1,33 до 1,21 В та збільшення електропровідності з 0,39 до 2,07 См/м.

Список використаних джерел

1. Solubility of metal oxides in deep eutectic solvents based on choline chloride / A. P. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, K. J. McKenzie, & S. U. Obi // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2006. – Vol. 51(4). – Pp. 1280-1282.

2. Natural deep eutectic solvents: properties, applications, and perspectives / Y. Liu, J. B. Friesen, J. B. McAlpine, D. C. Lankin, S. N. Chen, & G. F. Pauli // Journal of natural products. – 2018. – Vol. 81(3). – Pp. 79-690.

3. Modeling the physicochemical properties of natural deep eutectic solvents / A. Kovács, E. C. Neyts, I. Cornet, M. Wijnants & P. Billen // ChemSusChem. – 2020. – Vol. 13(15). – Pp. 3789-3804.

4. The perspectives of natural deep eutectic solvents in agri-food sector / A. Mišan, J. Nađpal, A. Stupar, M. Pojić, A. Mandić, R. Verpoorte & Y. H. Choi // Critical reviews in food science and nutrition. – 2020. – Vol. 60(15). – Pp. 2564-2592.

5. Дослідження компонентного складу та антиоксидантних властивостей екстракту продукту переробки томата / В. Воробйова, М. Скіба, І. Трус, С. Кирій, С. Сіренко // Технічні науки та технології. – 2021. – № 1(23). – С. 145-151.

6. Екстракція жмиху томату «зеленим» розчинником та оцінка антиоксидантних властивостей / В. І. Воробйова, М. І. Скіба, І. М. Трус, Г. С. Васильєв // // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут іменя Ігоря Сікорського» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2021. – № 2. – С. 59–65.

References

1. Abbott, A. P., Capper, G., Davies, D. L., McKenzie, K. J., & Obi, S. U. (2006). Solubility of metal oxides in deep eutectic solvents based on choline chloride. *Journal of Chemical & Engineering Data*, *51*(4), 1280-1282.

2. Liu, Y., Friesen, J. B., McAlpine, J. B., Lankin, D. C., Chen, S. N., & Pauli, G. F. (2018). Natural deep eutectic solvents: properties, applications, and perspectives. *Journal of natural products*, *81*(3), 679-690.

3. Kovács, A., Neyts, E. C., Cornet, I., Wijnants, M., & Billen, P. (2020). Modeling the physicochemical properties of natural deep eutectic solvents. *ChemSusChem*, *13*(15), 3789-3804.

4. Mišan, A., Nađpal, J., Stupar, A., Pojić, M., Mandić, A., Verpoorte, R., & Choi, Y. H. (2020). The perspectives of natural deep eutectic solvents in agri-food sector. *Critical reviews in food science and nutrition*, *60*(15), 2564-2592.

5. Vorobyova, V., Sciba, M., Trus, I., Kyrii, S., & Sirenko, S. (2021). Research of component composition and antioxidant properties of tomato processed product extract. *Technical Sciences and Technology*, 1(23), 145–151.

6. Vorobyova, V., Skiba, M., Trus, I., & Vasyliyev, H. (2021). Extraction of tomato pomace with "green" solvents and evaluation of antioxidant properties. *Proceedings of the NTUU "Igor Sikorsky KPI". Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving*, (2), 59–65.

Отримано 08.06.2022

UDC 665

Viktoriia Vorobyova[1], Georgii Vasyliev[2], Inna Trus[3], Olga Linyucheva[4]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Physical Chemistry
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
ResearcherID: J-5678-2017. **Scopus Author ID:** 55808771000

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Department of Electrochemical Production Technology
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: g.vasyliev@kpi.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4056-5551
ResearcherID: I-3058-2018. **Scopus Author ID:** 56105504500

[3]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: inna.trus.m@gmail.com. **ORCID**: http://orcid.org/0000-0001-6368-6933
ResearcherID: I-3204-2017. **Scopus Author ID:** 56152219600

[4]Doctor in Technical Sciences, Dean of Faculty of Chemical Technology
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: ovlin13@ukr.net. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0003-4181-5946
ResearcherID: I-3755-2018. **Scopus Author ID:** 6506162803

ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF NATURAL IONIC LIQUIDS OF NEW GENERATION

Nowadays, the development of modern chemical technology and engineering is aimed at the concept of greening and implementation of "green" technologies. Therefore, the study of deep eutectic solvents (DES), which are cheap and environmentally friendly, is of particular importance. DES are a class of novel green solvents with a wide range of properties and applications. In the work, 6 solvents were synthesized using choline chloride, lactic acid, proline, betaine, propanol, and urea. These constituents jointly determine the nature of the synthesized DESs and their electrochemical behavior. The knowledge of physicochemical, electrochemical properties of DESs is also valuable to DESs practical applications. Electrical conductivity indicates the strength with which DESs can conduct electricity. The focus of the investigation is physicochemical properties (electrical conductivity, electrochemical window) deep eutectic solvents (DESs). The formation of hydrogen bonds between the components was confirmed and the electrochemical characteristics of the synthesized ionic liquids were determined. The conducted studies showed that urea and lactic acid are the most suitable compounds for the formation of DES. DESs have been synthesized using choline chloride, Betaine and Proline as hydrogen bond acceptors (HBAs). Choline chloride-urea, Choline chloride-lactic acid, Sodium acetate-lactic acid, Choline chloride-propanediol, Proline-lactic acid, Betaine-lactic acid were synthesized. The electrical conductivity of deep eutectic solvents was measured and the width of the electrochemical window was evaluated using cycling voltammetry. FTIR-ATR was carried out to confirm the formation of the DESs. FT-IR results confirmed that H-bonds, occurring between two components in DES, were the main force leading to the eutectic formation. Adding water in quantity 1...25% leads to a decrease in the width of the electrochemical window from 1.33 to 1.21 V and increase in electrical conductivity from 0.39 to 2.07 S/m.

Keywords: *deep eutectic solvents; choline chloride; IR spectroscopy; electrical resistance.*

Fig.: 4. Table: 3. References: 6.

Воробйова В., Васильєв Г., Трус І., Лінючева О. Визначення електрохімічних властивостей природних іонних рідин нового покоління. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 88-95.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-96-102
УДК 621.923.42

Валерій Бакалов[1], Віктор Кузьменко[2], Ігор Яриш[3]

[1]кандидат технічних наук, доцент, науковий співробітник
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)
E-mail: bakalow1972@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8602-7778. **ResearcherID:** J-1337-2014

[2]начальник науково-дослідного відділу
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)
E-mail: dbrnjh.z@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8008-4299. **ResearcherID:** GLQ-8442-2022

[3]науковий співробітник
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)
E-mail: peredaha0983@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0212-0466. **ResearcherID:** GLQ-7481-2022

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ НАПРУЖЕНЬ ЗСУВУ ПОЛІЕТИЛЕНУ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ І ШВИДКОСТІ ЗСУВУ

На основі проведених досліджень отримано рівняння залежності напруження зсуву поліетилену від швидкості його зсуву та температури. У рівнянні напруження зсуву прямо пропорційне умовній в'язкості та градієнту швидкості зсуву в ступені, який є індексом течії. Показано, що умовна в'язкість поліетилену добре описується рівнянням Арреніуса, а індекс течії має квадратичну залежність від температури. Отримане узагальнене рівняння напружень зсуву поліетилену від швидкості його зсуву та температури дозволить більш точно розраховувати геометричні розміри формуючих каналів екструдерів, плоскощілинних головок, а також удосконалити системи управління вказаними пристроями.

Ключові слова: *поліетилен; реологічні властивості; напруження зсуву; швидкість зсуву; температура.*
Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Поліетилен знаходить дедалі більше застосування в різних галузях промисловості. Наприклад, у легкій, медичній та інших галузях поліетилен використовується як пакувальний або конструктивний матеріал. Реологічні властивості поліетилену впливають на якість продукції, яка виробляється. Тому знання цих властивостей впливає на методи проєктування обладнання, яке виробляє матеріали з поліетилену, а також на систему управління технологічними процесами таких виробництв.

Постановка проблеми. При проєктуванні обладнання для переробки поліетилену, а саме формуючих каналів екструдерів, плоскощілинних головок постає питання точного визначення его реологічних властивостей залежно від температури і швидкості зсуву. Залежно від вказаних реологічних властивостей змінюються геометричні розміри вказаних каналів. Вказані реологічні властивості здебільшого визначаються на підставі дослідів, які проводяться при визначених швидкостях зсуву і температурах. При проєктуванні виникає потреба розрахувати геометричні розміри формуючих каналів при швидкостях зсуву і температурах, відмінних від експериментальних. Тому виникає потреба дослідити залежність напружень зсуву поліетилену від температури і швидкості зсуву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [1-9], що реологічні властивості поліетилену значною мірою залежать від температури і швидкості зсуву. Реологічні властивості поліетилену досліджуються експериментально на приладах, які називаються віскозиметрами. У цих приладах поліетилен розігрівається до певної температури і при заданому зусиллі зсуву визначається швидкість витікання поліетилену із пристрою. Враховуючи, що вказані параметри значно впливають на реологічні властивості, то отримані в дослідах результати представляють у виді графіків залежності напружень зсуву (τ) від швидкості зсуву ($\bar{\gamma}$) в логарифмічних координатах при певній температурі (рис. 1) [2; 4; 6-8].

Як видно із графіків, існують квантовані значення температур, при яких проводились досліди і температура значно впливає на напруження зсуву.

© Бакалов В. Г., Кузьменко В. О., Яриш І. Ю., 2022

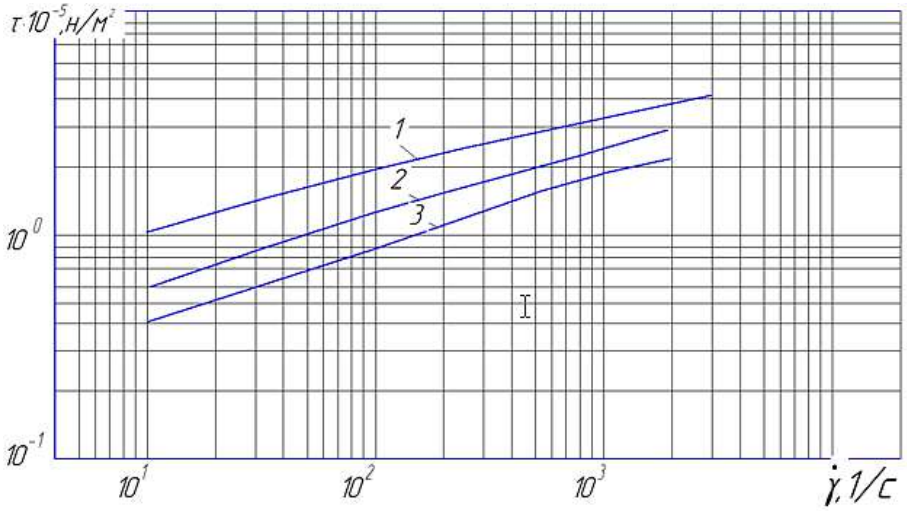


Рис. 1. Залежність напруження зсуву від його швидкості для поліетилену марки 15802-020: 1 – T_1 = 120 °С; 2 – T_2 = 150 °С; 3 – T_3 = 180 °С

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що відомі методи не дозволяють розрахувати реологічні властивості поліетилену при неквантованих температурах. Для отримання значень зусиль зсуву поліетилену від швидкості зсуву і температури, які не збігаються з квантованими експериментальними значеннями, у літературі відсутні рекомендації щодо їх визначення.

Метою статті є дослідження залежності напруження зсуву поліетилену від температури та швидкості зсуву й отримання аналітичного рівняння, що описує вказану залежність. Таке рівняння дозволить підвищити точність розрахунків обладнання для переробки поліетилену при його проєктуванні, а також покращити систему управління вказаним обладнанням.

Виклад основного матеріалу. Розплавлений поліетилен є неньютонівською рідиною, і основне рівняння, що описує його поведінку при різних швидкостях зсуву, має вигляд [1-3]:

$$\tau = \mu_0 \bar{\lambda}^n = \mu_0 \left(\frac{dv}{dx} \right)^n , \qquad (1)$$

де τ – напруження зсуву, Па;

μ_0 – «умовна» в'язкість, Па ·с;

$\bar{\gamma}$ – швидкість зсуву, $с^{-1}$;

n – індекс течії;

v – швидкість течії полімеру, м/с;

x – поточна координата, м.

На думку авторів [1; 5-9], доцільно вивчати в'язкість полімерів, використовуючи графічну залежність напруження від швидкості зсуву $\ln\tau = f(\ln\bar{\lambda})$ при різних значеннях температури в логарифмічних координатах (див. рис. 1).

Із графіків залежності напруження від швидкості зсуву в логарифмічних координатах для різних марок поліетилену [1-3] видно, що вони мають при різних температурах лінійну залежність, тому доцільно описати їх математичним виразом (1), який в логарифмічних координатах буде мати лінійну залежність виду:

$$\ln\tau = \ln\mu_0 + n\ln\bar{\lambda}) . \qquad (2)$$

Таким чином, для знаходження індексу течії *n* (тангенс кута нахилу прямих) потрібно мати дві точки на прямій графіка (рис. 1) при тій самій температурі:

$$n = \frac{\log \tau_1 - \log \tau_2}{\log \dot{\gamma}_1 - \log \log \dot{\gamma}_2}, \tag{3}$$

де τ_1, τ_2, – значення напружень зсуву в перший і другій точках;

$\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$ – значення швидкості зсуву в перший і другій точках.

З рівняння (2) знайдемо «умовну» в'язкість μ_0, яка залежить тільки від температури, як видно з рис. 1:

$$\ln \mu_0 = \ln \tau - n \ln \dot{\lambda}. \tag{4}$$

Використовуючи рівняння (4), розрахуємо умовну в'язкість μ_0 для різних температур (наприклад, для рис. 1 маємо 3 умовні в'язкості). Температурну залежність умовної в'язкості μ_0 від температури представимо у вигляді рівняння Арреніуса [1-4]:

$$\mu_0 = A \cdot e^{E/RT}, \tag{5}$$

де A – коефіцієнт, що залежить від виду полімеру;

E – енергія активації течії, Дж/моль;

R – газова стала (R=8,314 Дж/(моль·К);

T – температура, градус Кельвіна.

У рівнянні (5) невідомими є величини A і E, і для їх знаходження приведемо дане рівняння до виду:

$$E = \frac{R\left(\ln \mu_{01} - \ln \mu_{02}\right)}{1/T_1 - 1/T_2}; \tag{6}$$

$$A = \frac{\mu_{01}}{e^{E/RT_1}}, \tag{7}$$

де μ_{01}, μ_{02} – умовні в'язкості при температурах T_1 та T_2.

Для розрахунку індексу течії *n*, «умовної» в'язкості μ_0 для різних температур та швидкостей зсуву була розроблена програма, яка обробляє отримані експериментальні дані. У результаті розрахунків отримано залежності індексу течії *n* від температури для різних типів полімерів (рис. 2).

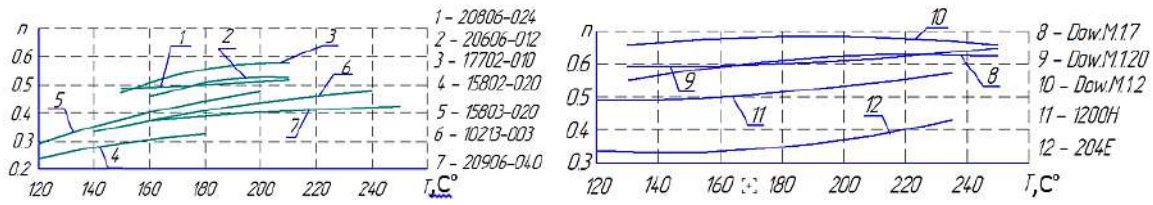


Рис. 2. Залежності індексу течії від температури для різних марок поліетилену

Як видно з графіків, індекс течії розплаву полімерів значною мірою залежить від температури та має нелінійний характер. На наш погляд, графіки можливо апроксимувати квадратичним рівнянням типу [3]:

$$n = c \cdot T^2 + d \cdot T + z, \tag{8}$$

де *c, d, z* – безрозмірні коефіцієнти.

Безрозмірні коефіцієнти *c, d, z* знаходимо за рівняннями для трьох різних температур:

$$d = \frac{\left(T_1^2 - T_2^2\right)\left(n_2 - n_3\right) - \left(T_2^2 - T_3^2\right)\left(n_1 - n_2\right)}{\left(T_1^2 - T_1^2\right)\left(T_2 - T_3\right) - \left(T_2^2 - T_3^2\right)\left(T_1 - T_2\right)}, \quad (9)$$

$$c = \frac{-d\left(T_1 - T_2\right) + \left(n_1 - n_2\right)}{\left(T_1^2 - T_1^2\right)}, \quad (10)$$

$$z = n_1 - c \cdot T_1^2 - d \cdot T_1 \quad (11)$$

де T_1, T_2, T_3 – температури у трьох різних точках;

n_1, n_2, n_3 – індекси течії у трьох різних точках температур.

Отримані результати розрахунку коефіцієнтів d, c, z A і E дозволяють представити залежність напруження зсуву від його швидкості і температур у вигляді:

$$\tau = A \cdot e^{E/RT} \dot{\gamma}^{-cT^2 + dT + z}. \quad (12)$$

Таким чином, рівняння (12) дозволяє розрахувати напруження зсуву від його швидкості та температури розплаву поліетилену. В інженерній діяльності прийнято використовувати формулу (1). Тому нами для кожної марки поліетилену отримано два рівняння для розрахунку умовної в'язкості й розрахунку індексу течії, які залежать від температури. Для кожного типу поліетилену рівняння представлені в таблиці 1. Порівняння даних отриманих за графіками, які наведені авторами [2; 3; 5-8], та розрахованих за рівняннями, наведеними в таблиці 1, показало, що похибка для марок поліетилену 1-7 із таблиці 1 не перевищує 2 %, а для марок 8-12 не перевищує 8 %.

Таблиця 1 – Рівняння для розрахунку умовної в'язкості й індексу течії від температури

№ р/р	Марка поліетилену	Рівняння для розрахунку умовної в'язкості від температури	Рівняння для розрахунку індексу течії від температури
1	Поліетилен 20806-024	$\mu_0 = 25.09 \cdot e^{20961.92/(R\cdot(273+T))}$	$n = 0.43 + 1.75\cdot10^{-4}\cdot T + 1.25\cdot10^{-6}\cdot T^2$
2	Поліетилен 20606-012	$\mu_0 = 49.69 \cdot e^{19439.02/(R\cdot(273+T))}$	$n = -0.53 + 1.02\cdot10^{-2}\cdot T - 2.50\cdot10^{-5}\cdot T^2$
3	Поліетилен 17702-010	$\mu_0 = 0.67 \cdot e^{34467.80/(R\cdot(273+T))}$	$n = -0.68 + 1.2\cdot10^{-2}\cdot T - 2.88\cdot10^{-5}\cdot T^2$
4	Поліетилен 15802-020	$\mu_0 = 9.81 \cdot e^{28517.42/(R\cdot(273+T))}$	$n = -0.34 + 7.08\cdot10^{-3}\cdot T - 1.90\cdot10^{-5}\cdot T^2$
5	Поліетилен 15803-020	$\mu_0 = 0.46 \cdot e^{37524.90/(R\cdot(273+T))}$	$n = -0.20 + 5.26\cdot10^{-3}\cdot T - 9.53\cdot10^{-6}\cdot T^2$
6	Поліетилен 10213-003	$\mu_0 = 9.10 \cdot e^{29608.29/(R\cdot(273+T))}$	$n = -5.75\cdot10^{-4} + 3.62\cdot10^{-3}\cdot T - 5.69\cdot10^{-6}\cdot T^2$
7	Поліетилен 20906-040	$\mu_0 = 295.30 \cdot e^{15489.49/(R\cdot(273+T))}$	$n = 0.13 + 2.05\cdot10^{-3}\cdot T - 3.55\cdot10^{-6}\cdot T^2$
8	Поліетилен 204E	$\mu_0 = 40.61 \cdot e^{23708.08/(R\cdot(273+T))}$	$n = 0.55 - 3.14\cdot10^{-3}\cdot T + 1.11\cdot10^{-5}\cdot T^2$
9	Поліетилен 1200H	$\mu_0 = 0.89 \cdot e^{30167.21/(R\cdot(273+T))}$	$n = 0.62 - 2.02\cdot10^{-2}\cdot T + 7.70\cdot10^{-6}\cdot T^2$
10	Поліетилен Dow. M.1.2.	$\mu_0 = 5.72 \cdot e^{23478.90/(R\cdot(273+T))}$	$n = 0.45 + 2.47\cdot10^{-3}\cdot T - 6.55\cdot10^{-6}\cdot T^2$
11	Поліетилен Dow. M.1.20.	$\mu_0 = 0.77 \cdot e^{27868.77/(R\cdot(273+T))}$	$n = 0.59 - 1.60\cdot10^{-4}\cdot T + 1.61\cdot10^{-6}\cdot T^2$
12	ПВХ (рецептура 60)	$\mu_0 = 5.58 \cdot e^{30434.59/(R\cdot(273+T))}$	$n = 0.30 + 6.62\cdot10^{-4}\cdot T - 6.83\cdot10^{-6}\cdot T^2$

Слід зауважити, що рівняння (12), або рівняння з таблиці 1 дозволяють побудувати в просторових координатах у вигляді поверхні (рис. 3) напруження зсуву від його швидкості та температури. Як видно із рис. 3, поверхня має складний просторовий вигляд.

Отримане рівняння дозволяє розрахувати реологічні властивості різних марок поліетилену при заданих температурах і швидкостях зсуву. Це важливо при проєктуванні екструдерів, плоскощілинних головок або при управлінні обладнанням для переробки поліетилену.

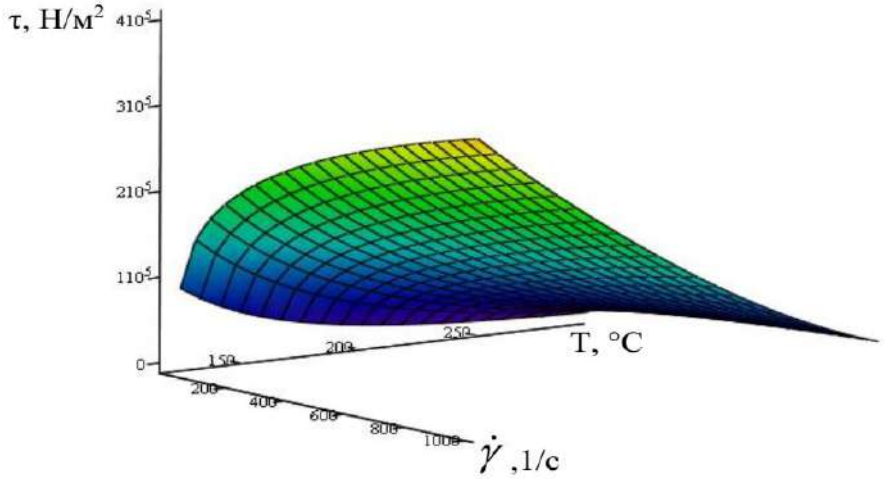


Рис. 3. Просторовий графік залежності напруження зсуву поліетилену марки 15802-020 від його швидкості и температури

Наприклад, для поліетилену марки 15802-020 з реологічними властивостями наведеними на рис. 1 з температурою T = 135 °C і постійному напруженні зсуву τ = 105000 н/м^2 розрахунок швидкості зсуву, прийнятий як середнє між температурами T = 125 °C і T = 150 °C, що дає значення γ = 32,5 с$^{-1}$. Це на 28,4 % більше, ніж розраховане за формулою (12) значення γ = 25,3 с$^{-1}$. Така помилка призведе до того, що система управління підвищить швидкість обертання валків, які витягують плівку й товщина останньої в результаті буде на 28,4 % тонше, ніж потрібно.

Висновки. На основі проведених досліджень отримано аналітичне рівняння, яке дозволяє розрахувати напруження зсуву поліетилену від його швидкості зсуву й температури. Отримані результати дозволять підвищити як точність проєктування обладнання для переробки поліетилену, так і систему управління вказаним обладнанням.

Список використаних джерел

1. Influence of polymer structure and amount on microstructure and properties of polyethylene-modified asphalt binders / K. L. Roja, A. Rehman, M. Ouederni, S.K. Krishnamoorthy, A. Abdala, E. Masad // Materials and Structures. – 2021. – Vol. 54. – Pp. 91. – DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-021-01683-0.

2. Thermomechanical properties of composites and their vulcanizates besed on high density polyethylene and copper / K.V. Allahverdiyeva, N.T. Kakhramanov, M.I. Abdulin, F.A. Mustafayeva // New Materials, Compounds and Applications. – 2020. – Vol. 4(2). – P. 141.

3. Areview of Asphalt Modification Using Plastics: A Focus on Polyethylene [Electronic resource] / Masad E., Roja K.L., Rehman A., Abdala A. – 2020. – Accessed mode: https://www.researchhate.net/publication/341152175.

4. Comparison of rheological properties and compatibility of asphalt modified with various polyethylene / M. Liang, X. Xin, W. Fun, J. Zhang, Z. Yao // Int j Pavem Eng. – 2019. – Pp. 1-10.

5. Saroufim E. A simple interpretation of the effect of the polimer type on the properties of PMBs for road paving applications / E. Saroufim, C. Celauro, M.C. Mistretta // Constr Build Mater. – 2018. – Vol. 158. – Pp. 114-123.

6. Яхно О. М. Основы реологии полимеров / О. М. Яхно, В. Ф. Дубовицкий. – К. : Вища школа, 1976. – 188 с.

7. Яхно О. М. Гідравліка неньютонівських рідин / О. М. Яхно, В. І. Желяк. – К. : Вища школа, 1995. – 199 с.

8. Чередніченко П. І. Плоскощілинні головки для ламінування матеріалів. Конструкція, розрахунок, проектування : монографія / П. І. Чередніченко, В. Г. Бакалов, О. В. Бакалов. – Чернігів, 2009. – 141 с.

9. Michaeli W., Kaul S., Wolff T. Computer-aided optimization of extrusion dies / W. Michaeli, S. Kaul, T. Wolff // Journal of Polymer Processing. – 2001. – Vol. 21. – Pp. 225-237.

References

1. Roja, K. L., Rehman, A., Ouederni, M., Krishnamoorthy, S.K., Abdala, A., Masad, E. (2021). Influence of polymer structure and amount on microstructure and properties of polyethylene-modified asphalt binders. *Materials and Structures, 54*, 91. https://doi.org/10.1617/s11527-021-01683-0.

2. Allahverdiyeva, K.V., Kakhramanov, N.T., Abdulin, M.I., Mustafayeva, F.A. (2020). Thermomechanical properties of composites and their vulcanizates besed on high density polyethylene and copper. *New Materials, Compounds and Applications*, *4*(2), 141.

3. Masad, E., Roja, K.L., Rehman, A., Abdala, A. (2020). Areview of Asphalt Modification Using Plastics: A Focus on Polyethylene. https://www.researchhate.net/publication/341152175.

4. Liang, M., Xin, X., Fun, W., Zhang, J., Yao, Z. (2019). Comparison of rheological properties and compatibility of asphalt modified with various polyethylene. *Int j Pavem Eng*, 1-10.

5. Saroufim, E., Celauro, C., Mistretta, M.C. (2018). A simple interpretation of the effect of the polimer type on the properties of PMBs for road paving applications. *Constr Build Mater, 158*, 114-123.

6. Yakhno, O.M., Dubovitsky, V.F. (1976). *Osnovy reologii polimerov [Fundamentals of polymer rheology]*. Higher school.

7. Yakhno, O.M., Zhelyak, V.I. (1995). *Hidravlika neniutonivskykh ridyn [Hydraulics of non-Newtonian fluids]*. Higher school.

8. Cherednichenko, P.I., Bakalov, V.G., Bakalov, O.V. (2009). *Ploskoshchilynni holovky dlia laminuvannia materialiv. Konstruktsiia, rozrakhunok, proektuvannia [Flat slotted heads for lamination of materials. Construction, calculation, design]*. Chernihiv.

9. Michaeli, W., Kaul, S., Wolff, T. (2001). Computer-aided optimization of extrusion dies. *Journal of Polymer Processing, 21*, 225-237.

Отримано 30.05.2022

UDC 621.923.42

Valery Bakalov[1], Victor Kuzmenko[2], Igor Yarish[3]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Research Fellow of the State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: bakalow1972@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8602-7778. **ResearcherID:** J-1337-2014

[2]Head of the Research Department of the State Research Institute for Testing and Certification of Arms and Military Equipment (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: dbrnjh.z@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8008-4299. **ResearcherID:** GLQ-8442-2022

[3] Research Fellow of the State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: peredaha0983@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0212-0466. **ResearcherID:** GLQ-7481-2022

STUDY OF THE DEPENDENCE OF SHEAR STRESSES OF POLYETHYLENE ON TEMPERATURE AND SHEAR VELOCITY

Polyethylene is increasingly used in various industries such as light, medical and others as a variety of packaging and structural materials. Rheological properties of polyethylene affect products quality. Therefore, knowledge of these properties affects the calculation methods of equipment that produces materials from polyethylene, as well as the control system of technological processes of such industries.

When designing equipment for processing polyethylene, namely the forming channels of extruders, flat slotted heads, the question of accurate determination of its rheological properties depending on the temperature and shear rate arises. Depending on the specified rheological properties the geometrical sizes of the specified channels change. These rheological properties are usually determined on the basis of experiments conducted at certain shear rates and temperatures. When designing, there is a need to calculate the geometric dimensions of the forming channels at shear rates and temperatures other than experimental. Therefore, there is a problem of developing a method of calculating these dimensions on the basis of experimental data obtained at other shear rates and temperatures.

On the basis of the conducted research, the equation of the dependence of the shear stress of polyethylene on its shear rate and temperature was obtained. In the equation, the shear stress is directly proportional to the conditional viscosity and the shear rate gradient in power, which is the flow index. It is shown that the conditional viscosity of polyethylene is well described by the Arrhenius equation, and the flow index has a quadratic dependence on temperature. The obtained generalized equation of shear stress of polyethylene from its shear rate and temperature will allow to more accurately calculate the geometric dimensions of the forming channels of extruders, slotted heads, as well as to improve control systems for these devices.

Kewords: *polyethylene; rheological properties; shear stress; shear rate; temperature.*

Fig.: 3. Table: 1. References: 9.

Бакалов В., Кузьменко В., Яриш І. Дослідження залежності напружень зсуву поліетилену від температури і швидкості зсуву. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 96-101.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-102-110
УДК 664.681.2

Ольга Середа[1], Оксана Мельник[2]

[1]аспірант
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)
E-mail: seaol@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-2614-725X

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри технології харчування
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)
E-mail: oxana7@i.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9201-7955. **ResearcherID:** AHE-3206-2022

НОВИЙ ВИД ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СИРОВИНИ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ БІЛКУ ДЛЯ БІСКВІТНИХ ВИРОБІВ

Стаття є оглядовою. У статті обґрунтовано теоретичне використання борошна із цвіркунів, яке містить велику кількість білку в порівняні з іншою сировиною, досліджено різні види борошна із цвіркунів за органолептичними показниками та встановлено перспективи його використання у виробництві кондитерських виробів функціонального призначення, зокрема у виготовленні бісквітних виробів. Розглянуто основні принципи вирощування цвіркунів, які надалі використовуються як сировина для борошна. Проаналізовано властивості різних видів цвіркунів та продуктів із них, обґрунтовано вибір борошно для подальшого використання з високими органолептичними показниками та технологічними властивостями.

Ключові слова: *бісквітний напівфабрикат; білковий компонент; борошно із цвіркунів; білок; кондитерська промисловість; борошняні кондитерські вироби.*

Табл.: 3. Рис.: 1. Бібл.: 19.

Актуальність теми. Нині ринок кондитерських виробів в Україні – це велика група найрізноманітніших тортів, тістечок, десертів, асортимент яких та об'єми виробництва постійно збільшуються. Кондитерські вироби досить популярні серед населення, особливо серед дітей, тому удосконалення їх технології та підвищення харчової цінності шляхом використання нової сировини й технологічних заходів є досить актуальним. Вироби, які мають особливу популярність серед споживачів кондитерських виробів, – це торти та тістечка з використанням бісквітних напівфабрикатів.

Бісквітні вироби – це продукти харчування з підвищеним вмістом цукру та високою засвоюваністю, які мають гарну пористість, приємний смак, з тонким ароматом та привабливим зовнішнім виглядом.

Однак вони характеризуються високою калорійністю, низькою біологічною цінністю та мають недостатній вміст вітамінів і мінералів у своєму складі. Для підвищення харчової та біологічної цінності бісквітних виробів застосовується нова сировина, використання якої у виробництві бісквітів дозволяє отримати продукт функціонального призначення, з проєктованими властивостями.

Постановка проблеми. Бісквітні продукти є висококалорійними і не рекомендовані до споживання у великих кількостях. Однак враховуючи їхню популярність, актуальним є створення нових продуктів із високим вмістом білка, харчових волокон, вітамінів, мінералів, при цьому з пониженим вмістом жирів і простих вуглеводів. Важливо не тільки покращити поживність, але і зберегти структурно-механічні властивості бісквітного тіста та готових виробів, які залежать від внутрішньої структури системи та її складових.

Бісквітне тісто являє собою гетерогенну емульсійну систему, що складається з розчинів високомолекулярних сполук (яєчний білок, колоїди пшеничного борошна) і низькомолекулярних сполук (сахароза, мінерали борошна), емульгованого жиру, яєчного жовтка та крохмальних зерен. Якість сировини, яку використовують для виробництва бісквітних виробів, може впливати на швидкість замішування та структурно-механічні властивості тіста. При замішуванні традиційного бісквітного тіста (холодним або гарячим способом) основним водопоглинаючим компонентом є клейковина пшеничного борошна, яка впливає на процеси структуроутворення в бісквіті [1]. Короткочасне замішування збитої яєчно-цукрової суміші з борошном може зменшити набухання клейковини і підвищити її еластичність, що призводить до підвищення пружності тіста, а це, у свою чергу, підвищує щільність структури готового бісквіту.

© Середа О. Г., Мельник О. Ю., 2022

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проаналізувавши публікації вчених, які мали на меті підвищення біологічної цінності бісквітних виробів, встановлено, що вдосконалення наявної технології виготовлення напівфабрикатів бісквіта полягає в основному у використанні різноманітної нетрадиційної сировини для коригування харчової цінності та підвищення стійкості бісквітного тіста при виробництві та випіканні.

Так, Н. Денисова зі співавторами [2] зазначає, що при додаванні 5 та 10 % вівсяного борошна й 10 % яблучного пюре в рецептуру бісквітного напівфабрикату сприяє поліпшенню споживчих властивостей готового виробу, підвищується харчова цінність продукту та змінюються органолептичні показники.

При використанні 50 % екструдованого кукурудзяного борошна, стабілізується в'язкість бісквітного тіста при збільшенні швидкості зсуву в межах 12,0-25,0 $с^{-1}$ зазначають науковці Т. Лісовська, Н. Чорна та О. Дьяков [3]. Науково доведено, що замінивши пшеничне борошно борошном із насіння льону, можна отримати бісквітне тісто більш в'язке та знизити пластичну деформацію готового продукту [4]. Позитивний ефект від додавання в бісквітне тісто 2 сортів борошна твердих сортів пшениці, з якого видалена зародкова частина, помічено за рахунок збільшення в'язкості, що дозволяє нормалізувати структуру тіста, як результат, отримаємо більш питому пористість та об'єм [5]. А. Корягін, В. Шелудько у своїй науковій статті «Удосконалення технології бісквітного печива» для збільшення білкового компоненту в бісквітному напівфабрикаті запропонували замінити пшеничне борошно борошном кіноа в кількості 20 % до маси пшеничного борошна. Вони охарактеризували, що борошно кіноа включає в себе 37,8 % білків, на 22,9 % менше вуглеводів, у 4 рази більше калію, в 2,6 більше кальцію та в 3 рази більше заліза [6].

Мета роботи – визначення джерел функціональної сировини з підвищеним вмістом білку, порівняльна характеристика та вибір сировини для подальшого використання в бісквітних виробах функціонального призначення.

Виклад основного матеріалу. Білок міститься в різних видах сировини, які зазвичай людина споживає щодня.

Перелік сировини тваринного та рослинного походження з підвищеним вмістом білку представлено в таблиці 1 та 2.

Таблиця 1 – Тваринні продукти з високим вмістом білка

№ з/п	Сировина	Вміст білку на 100 г
1	2	3
М'ясна сировина		
1	М'ясо свинини нежирне	16,4
2	Філе індички	21,6
3	Філе курицi сире	18-23
4	М'ясо яловичини	18,9
5	М'ясо кролика	20,7
6	Баранина	16,3
7	Телятина	19,7
8	Яловича печінка	17-19
9	Печінка кролика	19
10	Шлуночки курячі	20
11	Свиняча печінка	18,8
12	Бараняча печінка	18,7
Рибна сировина		
13	Ікра	25-31
14	Тунець, у т. ч. консервований	23-26
15	Горбуша	21
16	Лосось, сьомга, сібас, дорадо	20-22
17	Сайра дрібна	20,4
18	Сайда, хек	19

Закінчення табл. 1

1	2	3
19	Оселедець сирий або слабо солений	18-20
20	Тріска, минтай	18-20
21	Морепродукти свіжі або розморожені	14-19
22	Скумбрія	18
Молочна сировина		
23	Молоко сухе незбиране	25,6
24	Сир твердий	21-27
25	М'які види сиру	18-21
26	Сир кисломолочний 5-9% жирності	16-17
27	Сир нежирний	18
28	Бринза	17,9

Таблиця 2 – Рослинні продукти з великим вмістом білка

№ з/п	Сировина	Вміст білка в продуктах (г білка на 100 г)
1	Яєчний порошок	44-46
2	Ядра волоський горіху	15-40
3	Спіруліна	50-60
4	Люпин	29-36
5	Соя	35-45
6	Сухий жовток	31-34
7	Сочевиця суха	24-25
8	Насіння гарбуза	19-25
9	Горох сухий	20-23
10	Кунжут	22,1
11	Квасоля біла суха	10-21
12	Люцерна	10-21
13	Мигдаль	18-21
14	Нут сухий	20,1
15	Насіння коноплі	20-33
16	Висівки	16-20
17	Льон	17-19
18	Амарант	14-18
19	Кеш'ю сирий	17-18
20	Фундук сушений	14-16
21	Тофу	13-16
22	Гречана ядриця	12,6
23	Пшоно	11-12
24	Вівсяна крупа	11-12
25	Яйця курячі	11-13
26	Борошно пшеничне в/с	10,3

Отже, із таблиць 1 та 2 видно, що найбільша кількість білків тваринного походження знаходяться в філе курячому, в рибних продуктах – це тунець, молочна продукція – сир твердий; рослинних білків найбільший відсоток на 100 г продукту в спіруліні, бобових продуктах та яєчному порошку.

Зазначимо, що більшість продуктів, які містять рослинний білок, завдяки методам обробки перетворюються на продукти первинної (борошно) та вторинної переробки (макуха, порошки, шрот) і застосовуються для виготовлення різних видів функціональних продуктів або кулінарних виробів для оздоровчого або лікувально-профілактичного призначення. У кондитерських виробах застосовується тільки рослинна сировина, яка містить певну кількість білка.

Продукти, які містять білки і представлені в таблицях 1 та 2 під час термічного оброблення втрачають певну кількість білка. Білок під час варіння, смаження та випікання

денатурується. Так, при нагріванні молока до 60 ^{0}С протягом 30 хв денатурується близько 1 % альбуміну (молочного білку). Щодо рослинних білків, то під час випікання тіста білки, які зазвичай містяться в борошні, денатурують і зсідаються, але при цьому їх гелі ущільнюються і виділяють значну кількість вологи, яка в них міститься. У навколишнє середовище волога не виходить, оскільки вона одразу поглинається крохмалем на його клейстеризацію.

Нині в Україні, а також у світі, крім асортименту кулінарних страв, змінюються і ставлення до кондитерських виробів. Зазвичай для того, щоб кондитерські вироби стали функціональними, до їхнього складу додають різну сировину для підвищення харчової та біологічної цінності, зменшення калорійності, подовження терміну зберігання. Одним зі способів зміни властивостей кондитерських виробів є додавання альтернативних видів борошна у склад борошняних кондитерських виробів, зокрема бісквітів.

Серед альтернативних видів борошна є борошно, яке виготовляється зі злакових культур, серед яких – борошно з амаранту, спельти, сої, льону, люцерни, коноплі, нуту, кіноа, гарбузового насіння та ін.

Серед нових видів борошна особливе місце посідає борошно з комах – цвіркунів, скорпіонів. У Регламенті про нові харчові продукти (регламент 2015/2283), у січні 2018 року було схвалено використання всіх харчових продуктів на основі комах. Регламент був затверджений у Європейському Органі з Безпеки Харчових Продуктів (the European Food Safety Authority (EFSA)), який офіційно запровадив використання нових видів сировини в усіх Європейських країнах [7].

Науковці розглядають комах [8], як потенційно важливе джерело білка, жирів, амінокислот, жирних кислот і харчових волокон для використання у виробництві харчових продуктах та отримання з них різних видів порошків, паст, борошна, рослинної олії [9]. Аналіз літературних джерел показав, що борошно з комах є сировиною, яка нині найширше використовується у харчовій промисловості [8-11].

Борошно із цвіркунів (переклад з англ. – *Cricket flour*) – це сировина з підвищеним вмістом білку, яка має колір від сіруватого до коричневого та ніжно-горіховий смак. Колір борошно залежить від денатурації білку в процесі сушіння комах, а смак та аромат утворюється в результаті реакції Майяра в процесі їх обробки. Розробкою борошна із цвіркунів займаються вчені з Америки [10], Киргизстану, Азії, Африки, на разі в Україні вирощування цвіркунів відбувається на фермі в місті Запоріжжя. У світовій практиці для борошна із цвіркунів зазвичай використовується домашній цвіркун (Achetadomesticus). Цвіркуни вирощують на так званих фермах. Так, компанія Aspire (США) вирощує цвіркунів на фермах великих за площею; всі способи вирощування є автоматизовані [12]. Цвіркуни вирощують на вертикальних фермах, яка оснащені сенсорами та автоматичними системами. За допомогою роботизованого модуля цвіркуни отримають ідеально розраховані обсяги їжі [12].

Водночас бельгійські фермери вирощують цвіркунів у типових фермах на півночі Брюсселя, причому в секторах з вирощування цвіркунів використовують картонні форми [13]. У Каліфорнії «Ферма долини Коало» розводять тисячі комах у шатрах із фольги з підігрівом, у яких встановлені ряди лотків та підвісних баків із комахами. Годують вони комах люцерною та квасолею, яку вирощують на цьому підприємстві [14].

Технологія виготовлення цвіркунів має певні особливості. Перед виготовленням борошна та визначенням його реологічних властивостей автори Raquel Lucas-González [9], Dorothy K. Murugu [10], Zieli´nska, E[18] зазначають, що цвіркуни попередньо заморожуються при температурі -20 ^{0}С, протягом 48 годин і ліофілізуються. Далі комах подрібнюють за допомогою млина, і отримане борошно просіюють через сито з отворами не менше 20 мм.

Певні компаній у всьому світі для збільшення вмісту білку в кондитерських виробах пропонують застосовувати борошно із цвіркунів у виготовленні печива, батончиків, чипсів, макаронів, коктейлів, смузі, хлібобулочних виробів, у яєчних стравах, вівсяних пластівцях, овочевих гамбургерах, чапатті, мафінів. Борошно із цвіркунів не містить глютену, тому деякі дослідники пропонують застосовувати його у виробництві хлібних виробах для людей, які мають непереносимість глютену, або хворіють на целіакію.

Незважаючи на те, що цвіркунове борошно дедалі більше набуває популярності у приготуванні хлібобулочних та кондитерських виробів, використання його у виробництві харчових продуктів ще досить обмежене.

Популярними видами цвіркунів, з яких готуються борошно для кондитерських виробів, є Gryllodessigillatus (Польща), Achetadomestica (Іспанія), GryllusAssimilis (Україна). Усі три види цвіркунів вирощуються в Європі. Порівняльний аналіз харчової цінності трьох видів борошна з цвіркунів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Харчова цінність борошна із цвіркунів

Показник	**борошно із цвіркунів виду:**		
	Gryllodes sigillatus (Польща) [19]	**Acheta domestica (Іспанія) [15]**	**Gryllus Assimilis (Україна) [15]**
Білок	58,19	45,09	65
Хітин	8,39	3,52	10
Жир	46,04	38,82	20
Зола	5,41	4,02	5
Калорійність (на 100 г)	529,18	12,33	471

Як видно з таблиці 3, різні види борошна з комах мають високий вміст білка у своєму складі, тому науковці [15] зазначають, що їхній білок рівноцінний білку, який міститься в м’ясі яловичини (30 %), свинини (27 %), баранини (28 %) та телятини (31 %). При переробці цвіркунів на борошно (порошок) їх висушують та подрібнюють, при цьому харчовий склад борошна залишається незмінним.

Також у кожному з досліджуваних зразків борошна містяться ненасичені жирні кислоти: пальмітинова та стеаринова; мононенасичені жирні кислоти; олеїнова кислота [16]; ліноленова [16], залізо та інші хімічні сполуки; кальцій, калій, магній, цинк; є вітаміни групи В, вітамін B_6 та B_{12} [15].

Зазначимо, що для виготовлення нових видів кондитерських та хлібобулочних виробів застосовується борошно із цвіркунів роду домашній Acheta domestica, наприклад в хлібові [16], чапаті [17], печиві [18], мафінах [19] та ін.

Вивчивши наукові праці дослідників за даним напрямом виділимо, що за органолептичними показниками борошну із цвіркунів притаманний колір від темно-зеленого до коричневого (залежно від види цвіркуна), запах – приємно горіховий, смак – горіховий, зовнішній вигляд – без домішок та однорідне (таблиця 4).

Таблиця 4 – Органолептичні показники якості борошна із цвіркунів

Показник	**борошно із цвіркунів виду:**		
	Gryllodes sigillatus (Польща) [19]	**Acheta domestica (Іспанія) [15]**	**Gryllus Assimilis (Україна) [15]**
Смак	3	4	5
Колір	4	5	4
Запах	4	3	5
Зовнішній вигляд	4	4	5
Загальна кількість балів	15	16	19

Визначення органолептичних показників якості видів борошна із цвіркунів представлених у таблиці 4 шляхом бального оцінювання за 5-бальною оцінковою шкалою представлено на профілограмі (рис. 1).

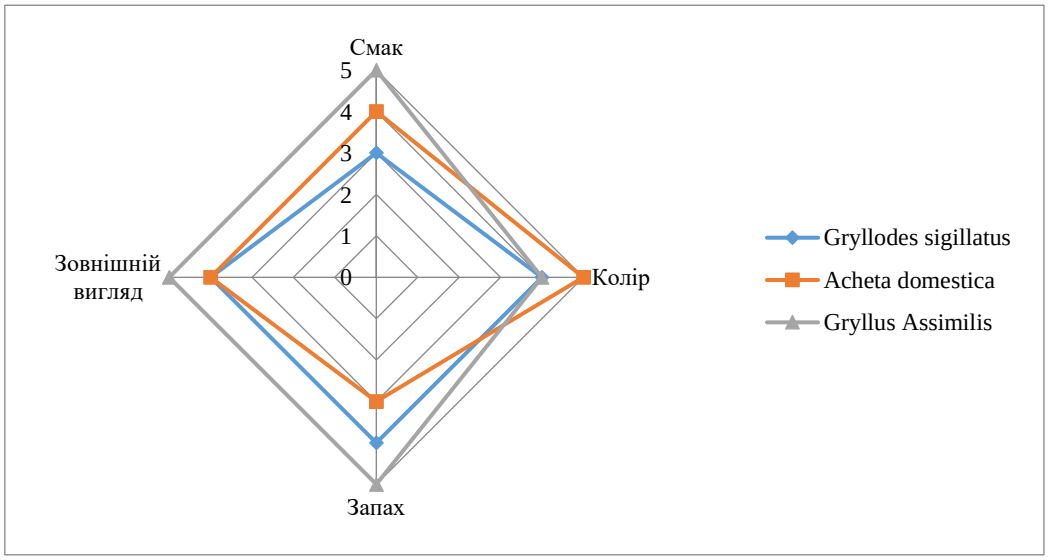


Рис. 1. Профілограма якості органолептичних показників досліджуваних зразків борошна із цвіркунів

Встановлено, що борошно із цвіркунів роду Gryllus Assimilis має більшу площу чотирикутника якості в порівняні з іншими видами борошна. Це, у свою чергу, характеризує високий рівень органолептичних показників, які надалі вплинуть на органолептичні показники готового виробу.

У подальшому досліджені борошно із цвіркунів українського виробника буде використовуватися у виробництві напівфабрикатів для тортів із підвищеним вмістом білка. Як видно з таблиці 3 та 4, цей вид борошна має гарні органолептичні показники та високу харчову цінність. Цвіркуни роду Gryllus Assimilis, за смаковими властивостями мають перевагу над іншими видами цвіркунів та вони є більш доступним у нашому регіоні, належать до сировини місцевого значення.

Важливим показниками якості для борошна із цвіркунів є мікробіологічні показники. Цвіркуни, як їстівні комахи, є носіями патогенних мікроорганізмів. Проте під час приготування борошна, цвіркуни піддаються обробці шляхом висушування при високих температурах. Це сприяє знищенню патогенної мікрофлори та утримання мікробіологічних показників у межах норми. Крім того, технологія виробництва бісквітних виробів передбачає внесення в рецептуру бісквіта великої кількості цукру та випікання виробів при високих температурах, що є несприятливим для розмноження не бажаних мікроорганізмів, тому під час додавання борошна із цвіркунів мікробіологічне забруднення готового виробу потенційно патогенними мікроорганізмами недопустиме.

Висновок. Узагальнюючи, можна зазначити, що ця тема є досить актуальною, оскільки використання нетрадиційної сировини з високим вмістом білку у виготовлені бісквітних виробів дозволить підвищити харчову та біологічну цінність виробів за рахунок додавання до напівфабрикату борошна із цвіркунів. Розглянувши властивості борошна з цвіркунів та проаналізувавши асортимент виробів, де воно використовується, зазначимо, що цей вид продукту не використовувався в технології виготовлення бісквітних виробів.

Борошно із цвіркунів має певний асортимент, який визначається за рахунок видів цвіркунів, з яких воно виготовляється. У цій роботі ми обрали борошно із цвіркунів роду Gryllus Assimilis, яке виготовляється в Україні, має приємний горіховий смак та аромат,

а також високі показники харчової цінності. Тому використання цього виду борошна дозволить отримати бісквітні напівфабрикати з високими органолептичними показниками, підвищеної харчової та біологічної цінності й у подальшому дасть можливість отримати борошняні кондитерські вироби з підвищеним вмістом білка.

Список використаних джерел

1. Кравченко М. Структурно-механічні властивості бісквітного тіста з борошном «Здоров'я» / М. Кравченко, В. Піддубний, О. Романенко // Товари і ринки. – 2017. – № 2. – С. 103.
2. Денисова Н. Дослідження впливу добавок вівсяного борошна та яблучного пюре на технологію виробництва бісквітів / Н. Денисова, Н. Буяльська, О. Моторко // Технічні науки та технології. – 2021. – № 3(25). – С. 229-236.
3. Лісовська Т. О. Дослідження реологічних властивостей бісквітного тіста з використанням екструдованого кукурудзяного борошна / Т. О. Лісовська, Н. В. Чорна, О. Г. Дьяков // Вост. Европейский журн. передовых технологий. – 2016. – № 2 (11). – С. 19-23.
4. Алексеев Г. В. Исследование структурно механических свойств бездрожжевого бисквитного теста на основе полножирной муки из семян льна / Г. В. Алексеев, В. Н. Красильников, М. С. Киреева // Вестник международной академии холода. – 2014. – № 2. – С. 69-73.
5. Сергачева Е. С. Исследование влияния нетрадиционного сырья на качество выпеченных полуфабрикатов [Електронний ресурс] / Е. С. Сергачева. – 2015. – Режим доступу: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanievliyaniya-netraditsionnogo-syrya-na-kachestvo-vypechennyh-polufabrikatov.
6. Корягін А. А. Удосконалення технології бісквітного печива / А. А. Корягін, В. М. Шелудько // Збір. наук. статей магістрів. – Полтава: ПУЕТ, 2018. – С. 175.
7. European Parliament. Regulation (EU) No 1169/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on theprovision of food information to consumers // Off. J. Eur. Union. – 2011. – № 304. – Pp. 18-63.
8. Govorushko S. Global Status of Insectsas Food and Feed Source: A Review / S. Govorushko // Trends Food Sci. Technol. – 2019. – № 91. – Pp. 436–445.
9. Effect of drying processes in the chemical, physico-chemical, techno functional and antioxidant properties of fours obtained from house cricket *(Achetadomesticus*) [Electronic resource] / Raquel Lucas-González, Juana Fernández-López, José A.Pérez-Álvarez, Manuel Viuda-Martos // European Food Research and Technology. – Accessed mode: https://doi.org/10.1007/s00217-019-03301-4.
10. From farm to fork crickets as alternative source of protein, mineral and vitamins / Dorothy K. Murugu, Arnold N. Onyango, Alex K. Ndiritu, Isaac M. Osuga,Cheseto Xavier, Dorothy Nakimbugwe, Chrysantus M. Tanga // Frontiersinnutrition. – 2021. – Vol. 8. – Pp. 1-14.
11. Microbiological Profile and Bioactive Properties ofInsect Powders Used in Food and Feed Formulations / Concetta Maria Messina, Raimondo Gaglio, Maria Morghese, Marco Tolone, Rosaria Arena, Giancarlo Moschetti, Andrea Santulli, Nicola Francesca, Luca Settanni // Foods. – 2019. – № 8. – P. 400. – doi:10.3390/foods8090400.
12. Цвіркуни проти яловичини: що будемо їсти через 5 років. 2017 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://landlord.ua/news/tsvirkuni-proti-yalovichini-shho-budemo-yisti-cherez-5-rokiv/.
13. У Бельгії на фермі вирощують їстівних цвіркунів. За матеріалами: Подробиці-ТВ [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу: https://podrobnosti.ua/2184369-u-belg-na-ferm-viroschujut-tsvrkunv.html.
14. Їжу майбутнього вирощують на спеціальній фермі. ВВС. 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vgolos.ua/news/yizhu-majbutnogo-vyroshhuyut-na-spetsialnyh-fermah_227534.html.
15. Insight into the proximate composition and microbial diversity of edible insects marketed in the European Union / Osimani A., Garofalo C., Milanovic´ V., et al. // European Food Research and Technology. – 2017. – № 243. – Pp. 1157–1171.
16. Cristina M. González. Insects as ingredients for bakery goods. A comparison study ofH. illucens,A. domestica and T. Molitor flours / Cristina M. González, Raquel Garzón, Cristina M. Rosell // Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2019. – № 51. – Pp. 205-210.

17. Rheological Characterization of Chapatti (Roti) Enriched with Flour or Paste of House Crickets *(Achetadomesticus*) [Electronic resource] / Habiba Khatun, Mik Van Der Borght, Mohammad Akhtaruzzaman, Johan Claes // Foods. – 2021. – № 10. – P. 2750. – Accessed mode: https://doi.org/10.3390/foods10112750.

18. Cricket-Enriched Oat Biscuit:Technological Analysis and Sensory Evaluation / Barbara Biró, Mária Anna Sipos, AnikóKovács, KatalinBadak-Kerti, KláraPásztor-Huszár, Attila Gere // Foods. – 2020. – № 9. – P. 1561. – Accessed mode: doi:10.3390/foods9111561.

19. Zieli´nska E. Nutritional, Physiochemical, and Biological Value of Muffins Enriched with Edible Insects Flourи / E. Zieli´nska, U. Pankiewicz, M. Sujka // Antioxidants. – 2021. – № 10. – P. 1122. – Accessed mode: https://doi.org/10.3390/antiox10071122.

References

1. Kravchenko, M., Piddubnyi, V., Romanenko, O. (2017). Strukturno-mekhanichni vlastyvosti biskvitno hotista z boroshnom «Zdorovia» [Structural and mechanical properties of biscuit dough with "Health" flour]. *Tovary i rynky – Goods and markets*, (2), 103.

2. Denysova, N., Buialska, N., Motorko, O. (2021). Doslidzhennia vplyvu dobavok vivsianoho boroshna ta yabluchnoho piure na tekhnolohiiu vyrobnytstva biskvitiv [Study of the influence of oat flour and apple puree additives on biscuit production technology]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (3(25)), 229-236.

3. Lisovska, T.O., Chorna, N.V., Diakov, O.H. (2016). Doslidzhennia reolohichnykh vlastyvostei biskvitnoho tista z vykorystanniam ekstrudovanoho kukurudzianoho boroshna [Research on the rheological power of biscuit dough for victorious extruded corn boar,]. *Vostochnyi Yevropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – East European Journal of Advanced Technologies*, (2(11)), 19-23.

4. Alekseev, H.V., Krasylnykov, V.N., Kyreeva, M.S. (2014). Issledovanie strukturno mekhanicheskykh svoistv bezdrozhzhevogo bsskvstnogo testa na osnove polnozhirnoi muki iz semian lna [Structural and mechanical properties of a yeast-free biscuit dough based on full-fat flour from flax seeds]. *Vestnik mezhdunarodnoy akademii kholoda – Bulletin of the International Academy of Cold*, (2), 69-73.

5. Serhacheva, E.S. (n.d.). Issledovanie vliianiia netraditsionnogo syria na kachestvo vypechennykh polufabrikatov [Research on the influence of non-traditional raw materials on the quality of baked semi-finished products]. https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie vliyaniya-netraditsionnogo-syrya-na-kachestvo-vypechennyh-polufabrikatov.

6. Koriahin, A.A., Sheludko, V.M. (2018). Udoskonalennia tekhnolohii biskvitnoho pechyva [Improvement of technology of biscuit biscuits]. *Zbirnyk naukovykh statey mahistriv – Collection of scientific articles of masters*, 175.

7. European Parliament (2011). Regulation (EU) No 1169/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on theprovision of food information to consumers. *Off. J. Eur. Union*, 304, 18–63.

8. Govorushko S. (2019). Global Status of Insectsas Food and Feed Source: A Review. *Trends Food Sci. Technol., 91*, 436–445.

9 Raquel Lucas-González, Juana Fernández-López, JoséA. Pérez-Álvarez, Manuel Viuda-Martos. (2019). Effect of drying processes in the chemical, physico-chemical, techno functional and antioxidant properties of fours obtained from house cricket *(Achetadomesticus*). *European Food Research and Technology*. https://doi.org/10.1007/s00217-019-03301-4.

10.Dorothy K. Murugu, Arnold N. Onyango, Alex K. Ndiritu, Isaac M. Osuga,Cheseto Xavier, Dorothy Nakimbugwe and Chrysantus M. (2021). Tanga.From farm to fork crickets as alternative source of protein, mineral and vitamins. *Frontiersinnutrition, 8*, 1-14.

11.Concetta Maria Messina, Raimondo Gaglio, Maria Morghese, Marco Tolone, Rosaria Arena, Giancarlo Moschetti, Andrea Santulli, Nicola Francesca, andLucaSettanni. (2019). Microbiological Profile and Bioactive Properties ofInsect Powders Used in Food and Feed Formulations. *Foods*, *8*, 400. doi:10.3390/foods8090400.

12.Tsvirkuny proty yalovychyny: shcho budemo yisty cherez 5 rokiv [Crickets vs. beef: what will we eat in 5 years]. (2017). https://landlord.ua/news/tsvirkuni-proti-yalovichini-shho-budemo-yisti-cherez-5-rokiv.

13.U Belhii na fermi vyroshchuiut yistivnykh tsvirkuniv. Za materialamy: Podrobytsi-TV [Edible crickets are grown on a farm in Belgium. According to the materials: Details-TV]. (2017). https://podrobnosti.ua/2184369-u-belg-na-ferm-viroschujut-tsvrkunv.html.

14.Izhu maibutnoho vyroshchuiut na spetsialnii fermi. VVS [The food of the future is grown on a special farm. BBC]. (2016). https://vgolos.ua/news/yizhu-majbutnogo-vyroshhuyut-na-spetsialnyh-fermah_227534.html.

15.Osimani, A., Garofalo, C., Milanovic´, V. et al. (2017). Insight into the proximate composition and microbial diversity of edible insects marketed in the European Union. Eur. *FoodRes. Technol.*, 243, 1157-1171.

16.Cristina M. González, Raquel Garzón, Cristina M. Rosell. (2019). Insects as ingredients for bakery goods. A comparison study of H. illucens, A. domestica and T. *Molitor flours Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *51*, 205-210.

17.Habiba, Khatun, Mik Van Der Borght, Mohammad, Akhtaruzzaman, & Johan, Claes. (2021). Rheological Characterization of Chapatti (Roti) Enriched with Flour or Paste of House Crickets *(Achetadomesticus). Foods*, *10*, 2750. https://doi.org/10.3390/foods10112750.

18.Barbara, Biró, Mária Anna, Sipos, Anikó, Kovács, Katalin, Badak-Kerti, Klára, Pásztor-Huszár, & Attila Gere. (2020). Cricket-Enriched Oat Biscuit: Technological Analysis and Sensory Evaluation. *Foods*, *9*, 1561. doi:10.3390/foods9111561.

19.Zieli´nska, E., Pankiewicz, U., Sujka, M. (2021). Nutritional, Physiochemical, and Biological Valueof Muffins Enriched with EdibleInsects Flour. *Antioxidants*, *10*, 1122. https://doi.org/10.3390/ antiox10071122.

Отримано 29.05.2022

UDC 664.681.2

Olha Sereda[1], Oksana Melnyk[2]

[1]Graduate Student, Department of Food Technology
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)
E-mail: seaol@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-2614-725X

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technology
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)
E-mail: oxana7@i.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9201-7955. **ResearcherID:** AHE-3206-2022

A NEW TYPE OF FUNCTIONAL RAW MATERIAL WITH INCREASED PROTEIN CONTENT FOR BISCUITS

The article is a review. Biscuit products are characterized as products for wide use. Cakes, pastries, and rolls with various additives, fillers, and creams are made from them. They are high-calorie products and they are not recommended for consumption in large quantities. That is why, the article substantiates the theoretical use of flour from crickets, which contains a large amount of protein compared to other food products. The need for the development of innovative products in confectionery production, and especially in the production of biscuit products, is characterized. When analyzing the latest researches and publications, it was determined that in order to increase the biological value of biscuit products, various non-traditional raw materials are used in the manufacturing technologies of the products, as a result, innovative products are obtained, which are given the status of functional. They gave a comparative description of various types of products with a high protein content. We substantiated the choice of raw materials with a high protein content for further use in functional biscuit products, namely cricket flour. The properties of cricket flour were characterized and an assortment of products made from it was presented. We considered the basic principles of growing crickets, which are later used as raw materials for flour. We analyzed the properties of different types of crickets and their products and selected flour for further use with high organoleptic indicators and technological properties. It was determined that the use of flour from crickets is a modern component in food technology, which was not previously used in the manufacture of biscuit products.

Keywords*: biscuit semi-finished product; protein component; flour from crickets; protein; confectionery industry; confectionery products.*

Table: 3. Fig.: 1. References: 19.

Середа О., Мельник О. Новий вид функціональної сировини з підвищеним вмістом білку для бісквітних виробів. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 102-110.

РОЗДІЛ IV. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-111-126
УДК 621.313

Василь Шинкаренко[1], Вікторія Котлярова[2], Євген Монахов[3], Павло Красовський[4]

[1]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
ResearcherID: AAK-3777-2020. **SCOPUS Author ID:** 7005550726

[2]старший викладач кафедри електромеханіки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: sharik_2004@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-4182-4175
ResearcherID: AAK-3782-2020. **SCOPUS Author ID:** 57202578038

[3]кандидат технічних наук, директор НДДКР
Чжуцзи Хейст Моторс ТОВ (Чжуцзи, Китай)
E-mail: emonachov@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-8408-8051
ResearcherID: AAK-3885-2020. **SCOPUS Author ID:** 57191825945

[4]аспірант кафедри електромеханіки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: krasovskyipav@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-4757-9879
SCOPUS Author ID: 57219491120

СТРУКТУРНІ МУТАЦІЇ В АДАПТИВНІЙ ЕВОЛЮЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Проаналізовано системність явища мутагенезу – одного з найменше дослідженого й найбільш продуктивного процесу структуроутворення в еволюції генетично організованих систем природного і антропогенного походження. Досліджено ізоморфізми поняття мутацій у системах різної генетичної природи. Узагальнено наукові положення хромосомної теорії спадковості об'єктів електромеханіки Проаналізовано напрями та приклади практичного використання хромосомних мутацій у просторово-адаптивному структуроутворенні об'єктів електромеханіки й визначено їхнє особливе значення в стратегії генетичного передбачення і контрольованої генетичної коеволюції людини, природи і техніки.

Ключові слова: *електромеханічні об'єкти; генетична еволюція; системні ізоморфізми; електромагнітна хромосома; генетичний код; хромосомна теорія структуроутворення; хромосомна мутація; адаптація.*

Табл.: 3. Рис.: 8. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Вагомим досягненням науки новітнього періоду стало усвідомлення того, що фундаментальні принципи спадковості й закони генетичної еволюції не обмежуються лише біологічними системами, а мають загальносистемний характер. Структурна різноманітність і еволюція генетично організованих систем (ГОС) різної фізичної природи, спектр яких простягається від систем космічного масштабу, через хімічні й біологічні, до соціальних і антропогенних систем, визначаються через відповідний структурно-інформаційний базис і фундаментальні принципи генетичної спадковості [1-6].

Постановка проблеми. З плином часу біологічна еволюція дедалі більшою мірою інтегрується з технічною еволюцією, яка стає однією з головних рушійних сил. Тому майбутнє співіснування природи, людини і техніки можливе лише за умови пізнання та гармонізації їхніх генетичних програм, які визначаються методами генетичного аналізу. Ключову роль у генетичному структуроутворенні систем зі спадковістю відіграють генно-хромосомні мутації, які виступають ефективним інструментом структурно-інформаційної адаптації генотипу до мінливих вимог і факторів впливу зовнішнього середовища (фенотипу).

© Шинкаренко В. Ф., Котлярова В. В., Монахов Є. А., Красовський П. О., 2022

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мутація (від лат. *mutatio* – зміна) належить до фундаментальних явищ, які визначають спадкову мінливість структур, відповідальних за зберігання і передачу генетичної інформації. Усі без винятку системи в процесі еволюції схильні до зміни власної генетичної програми шляхом мутацій. Тому в сучасній науці поняття мутації вийшло за межі біології і є об'єктом досліджень у фізиці (альфа-розпад, бета-розпад, процеси ділення ядра і синтез ядер), лінгвістиці (мовний мутагенез), теорії музики, математиці (топологія вузлів, альтернативні алгебри), обчислювальній техніці, архітектурі, соціології і політології, керуванні проєктами та в інших наукових дисциплінах [7-13]. Через ізоморфізм мутацій теоретики генно-культурної еволюції пояснюють процеси породження інновацій і психологію творчості [2; 12]. Системні принципи мутагенезу ізоморфно також пов'язані з механізмами виникнення емерджентності, теорією процесів біфуркації в синергетиці, теорією хаосу («ефект метелика», атрактори Лоренца), фізичними явищами турбулентності та дифузії. Тому види мутацій, спектр ознак і механізми їх виникнення визначаються фізичною природою відповідного елементно-інформаційного базису ГОС.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З огляду на системність і ключову роль процесів мутагенезу, одним із важливих напрямів досліджень є пізнання взаємопов'язаних еволюційних процесів генетичного структуроутворення і механізмів мутаційної спадкової мінливості об'єктів техніки, що відкриває шлях до стратегії генетичного передбачення і контрольованої коеволюції людини, природи й техніки.

Мета дослідження. Ця робота присвячена системному аналізу хромосомних мутацій – одного з найбільш продуктивних і найменш досліджених процесів в інноваційному структуроутворенні й еволюції електромеханічних об'єктів (ЕМ-об'єктів).

Виклад основного матеріалу. Основні положення хромосомної теорії спадковості об'єктів електромеханіки. Теоретичним базисом у дослідженні процесів еволюційного мутагенезу є теорія елементарних структур певної фізичної природи. «…У сучасній фізиці передбачається, що множина елементарних форм і функцій матерії обмежена, а нові форми і функції з'являються лише в результаті комбінацій і перетворень базисних форм і функцій» [14]. Тому теорія структур хромосомного рівня є ключовою і невід'ємною складовою еволюційної парадигми ГОС довільної фізичної природи. Як відомо, основні наукові положення хромосомної теорії вперше були сформульовані в біології у 1915 р., а у 1933 р. американський біолог Томас Морган отримав Нобелівську премію з фізіології і медицини за відкриття, пов'язані з роллю біологічних хромосом у спадковості [15].

У технічних науках основи хромосомної теорії і поняття електромагнітних хромосом (Е-хромосом), як необхідного рівня в теорії генетичної еволюції електромеханічних систем (ЕМ-систем), були розроблені лише через 87 років після біологічної [4]. Відкриттям генетичної класифікації (ГК) первинних джерел електромагнітного поля підтверджено, що електромеханічні перетворювачі енергії (ЕМПЕ) еволюціонують відповідно із системними принципами ГОС. У загальному випадку, під хромосомою розуміється елементарний генетично визначений носій генів, в ієрархії рівнів структурної організації систем зі спадковістю. У теорії генетичного структуроутворення поняттю Е-хромосоми ставиться у відповідність первинне джерело електромагнітного поля, генетична інформація якого однозначно визначається його положенням у періодичній структурі ГК [16]. Первинне джерело поля є носієм упорядкованої сукупності електричних зарядів (електромагнітних генів). Положення та інваріантні властивості довільного первинного джерела поля у структурі ГК визначаються його унікальною генетичною інформацією, яка представлена універсальним генетичним кодом. Тому довільна хромосома визначає просторову геометрію, групу електромагнітної симетрії і топологічні властивості (зв'язність та орієнтова-

ність) структур-нащадків. Структурно-інформаційний базис ГК, який представлений первинними джерелами електромагнітного поля, виконує роль вихідних структур у задачах генетичного аналізу й синтезу спадкових структур вищих рівнів складності.

Електромагнітні, топологічні й геометричні властивості Е-хромосом визначаються загальносистемними принципами збереження електричного заряду, електромагнітної симетрії і топології. Високоупорядкована множина Е-хромосом предметної області ГК виконує функцію глобальної макрогенетичної програми структуроутворення довільних Видів, Родів і функціональних класів ЕМ-об'єктів. Поняття Е-хромосоми ізоморфно поняттям біологічної хромосоми, хімічного елемента, музичного звуку, натурального числа, літері алфавіту та ін. За універсальним генетичним кодом Е-хромосоми визначаються: координати її місцеположення в періодичній структурі ГК; родова належність; інваріантна генетична інформація (генетичний код) Виду; генетична структура активних частин ЕМ-об'єктів-нащадків; генетична схильність хромосоми; структура малого періоду; структура підгрупи й відповідного горизонтального гомологічного ряду; гранична родова геометрія структур-нащадків; генетичний код парної хромосоми; гранична геометрія, топологія і симетрія хромосом-ізотопів та інші інваріантні властивості.

Генетична інформація довільної Е-хромосоми задовольняє принципу збереження і є інваріантною відносно часу еволюції об'єктів-нащадків, рівня їхньої структурної складності і функціонального призначення (рис. 1).

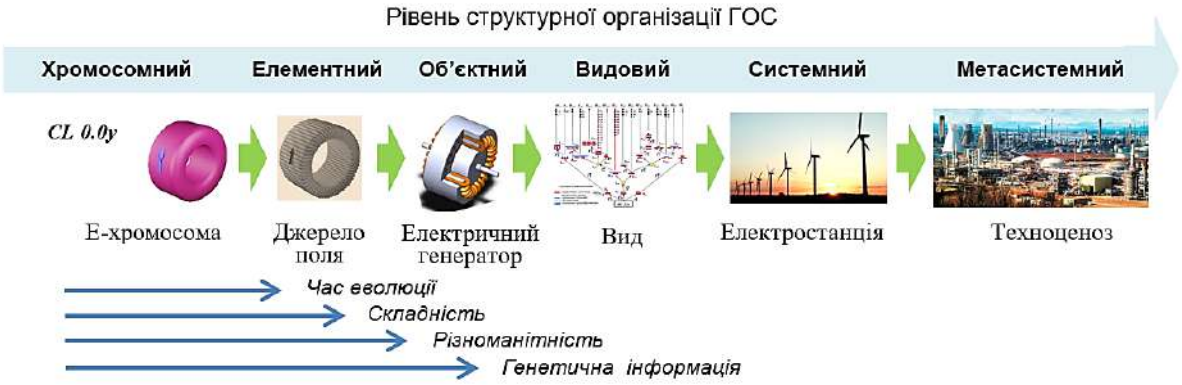


Рис. 1. Ієрархія рівнів структурно-інформаційної складності в генетично організованих системах (на прикладі електромеханічних)

Тому вся різноманітність історично створених ЕМ-об'єктів розпізнається через генетичні коди відповідних хромосом ГК.

В ієрархії взаємопов'язаних рівнів структурно-інформаційної складності ГОС, хромосомний рівень відіграє ключову роль у процесах спадкового структуроутворення.

Класифікація електромагнітних хромосом. Функцію системного носія високоупорядкованої інформації стосовно різноманітності Е-хромосом виконує ГК первинних джерел електромагнітного поля. Фундаментальність поняття Е-хромосоми і її інваріантні властивості визначаються принципами збереження електромагнітної структури й генетичної інформації. Принципи збереження визначають детермінований структурно-інформаційний зв'язок довільної Е-хромосоми зі структурою груп і періодів ГК і універсальним генетичним кодом, таксономічними категоріями Родів і Видів та структурною різноманітністю ЕМ-об'єктів-нащадків, що зумовлює необхідність класифікації її основних понять і тлумачень. Різноманітність смислових дефініцій Е-хромосом розпізнається:

- за місцеположенням Е-хромосоми в періодичній структурі ГК і класифікаційною належністю – базові, парні, гомологічні, хромосоми-ізотопи;

- за рівнем генетичної складності – батьківські, синтезовані (Е-хромосоми першого, другого, *n*-го рівня складності);

- за ознакою репродуктивності – інформаційні, породжувальні;
- за генетичним статусом – гомологічні, парні, репліковані, гібридні, інверсні, мутовані;
- за динамічними властивостями – нерухомі (статичні), рухомі (динамічні);
- за родовою приналежністю – циліндричні, конічні, плоскі, тороїдальні плоскі, сферичні, тороїдальні циліндричні, спіральні, гвинтові;
- за групою електромагнітної симетрії – електромагнітно симетричні (Е-хромосоми групи 0.0), дисиметричні (підгрупи 0.2y і 2.0x), асиметричні (групи 2.2);
- за топологічними властивостями – замкнені (без краю), розімкнені (з краями), односторонні, двосторонні, орієнтовані, неорієнтовані;
- за відповідністю хромосоми структурним еквівалентам первинної частини і вторинної частин ЕМПЕ – первинні, вторинні.

Залежно від типу завдань досліджень, для позначення Е-хромосом можуть використовуватися різні способи їх подання: кодове, символьне, графічне або змішане.

Хромосомна теорія становить теоретичний базис теорії генетичної еволюції ГОС. Теорія електромагнітних хромосом стала науковим фундаментом для розробки: геносистематики ЕМПЕ, генетичних програм структуроутворення, методології синтезу і аналізу електромеханічних структур (ЕМ-структур), технології генетичного передбачення, наукового обґрунтування генетичної природи видоутворення ЕМ-об’єктів близнюків і двійників, розробки теорії гібридних ЕМ-структур, методології генетичного синтезу структур модульного типу та ін.

Структурні мутації. Мутації в техніці – створювані штучно (індуковані) стійкі порушення генетично визначених структур, відповідальних за збереження і передачу генетичної інформації в ряду поколінь. Якщо в біології мутації розглядаються як основне й фактично єдине джерело адаптивної еволюції, то в теорії генетичного структуроутворення ЕМ-структур, мутація – один із п’яти принципів хромосомного структуроутворення, який визначає межі існування і генетично допустиму різноманітність мутованих об’єктів-нащадків. Структурні мутації в процесі синтезу реалізуються в комбінаціях з операторами реплікації, схрещування, кросинговеру та інверсії. За участю механізмів структурних мутацій змінюється генетична інформація, яка, за рахунок порушення класичних принципів електромеханічного перетворення енергії, забезпечує відповідні емерджентні властивості об’єкта в конкурентній боротьбі. Кінцева мета довільної мутації – структурно-функціональна адаптація об’єкта до вимог фенотипу.

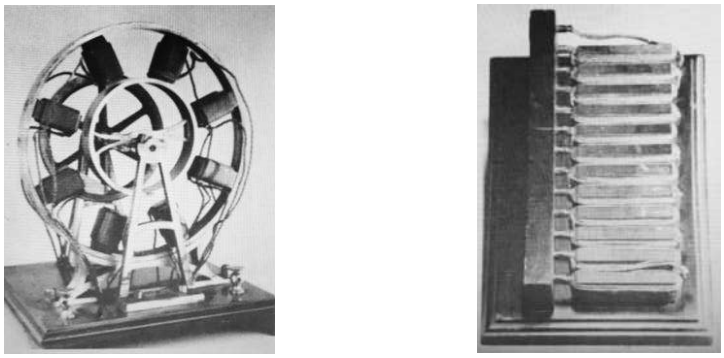
Структурна організація довільних функціональних класів ЕМ-систем представлена ієрархічною послідовністю рівнів генетичної складності: хромосомним (Ch); об’єктним (Ob); видовим (Sp); системним (Gn) та метасистемним (Mt). Генетичний аналіз і результати геномно-еволюційних експериментів засвідчують, що найбільшою універсальністю наділені принципи структурної мутації і гібридизації (схрещування), які задіяні на всіх рівнях складності ЕМ-об’єктів (табл. 1).

Таблиця 1 – Взаємозв’язок генетичних принципів структуроутворення з рівнями структурної складності ЕМ-об’єктів

Генетичний оператор	**Рівень структурної організації**				
	Ch	**Ob**	**Sp**	**Gn**	**Mt**
Реплікація (*R*)	+	+	—	—	—
Схрещування (*S*)	+	+	+	+	+
Інверсія (*I*)	+	+	—	—	—
Кросинговер (*C*)	+	+	—	—	—
Мутація (*M*)	+	+	+	+	+

На відміну від мутацій біологічного типу, структурні мутації в еволюції об'єктів техніки, з урахуванням жорстких вимог конкурентного відбору, орієнтовані на забезпечення лише корисної функції, тому властиві їм порушення генетичної структури мають бути скомпенсовані відповідним емерджентним ефектом. Наявність такого співвідношення гарантує стійку спадковість мутацій у конкурентній еволюції поколінь техніки.

Поява перших електричних машин-мутантів у першій половині XIX століття, безпосередньо пов'язана з діяльністю відомого англійського фізика й винахідника Чарльза Уітстона, соратника Фарадея і Ерстеда (рис. 2) [17].



а *б*

Рис. 2. Перші електричні машини-мутанти (Ч. Уітстон, Англія):
а – електромагнітний двигун з ексцентриковим ротором (1840);
б – плоский статор двигуна для електромагнітного транспортування сталевих циліндричних поковок (1845)

У генетичній еволюції об'єктів електромеханіки, плоский двигун із рухомим магнітним полем Ч. Уітстона виконує функцію архетипів щодо Роду плоских електричних машин, функціонального класу двигунів з ротором, що котиться (ДРК), ЕМ-систем для безпосереднього здійснення технологічних процесів, а також є першим представником класу внутрішньовидових гібридних ЕМ-структур – мутантів.

Функціонально двигун забезпечував електромагнітне транспортування циліндричних сталевих поковок, які виконували функцію ротора. З погляду генетичної еволюції, двигун Уітстона є архетипом Роду плоских електричних машин поступального руху, першим об'єктом Виду PL 2.2x і архетипом функціонального класу генетично мутованих електричних машин із ротором, що котиться. За результатами генетичного аналізу встановлено, що структура двигуна Уітстона відповідає статусу внутрішньовидового мутованого гібрида $(PL\ 2.2x)_1 \times [(CL\ 0.2y):M]_2$. Наступна еволюційна подія (технічна реалізація двигуна Виду $(CL\ 0.2y)_1 \times [(CL\ 0.2y):M]_2$) відбулася лише через 100 років, після чого еволюція функціонального класу ДРК набула стійкого прогресивного характеру (рис. 3).

З погляду принципів електромеханічної взаємодії, представники класу ДРК порушують всі класичні вимоги до процесу оптимального електромеханічного перетворення енергії та режиму функціонування (несиметричне магнітне поле збудження, наявність суттєвого ексцентриситету ротора, нерівномірний повітряний зазор, нескомпенсовані динамічні сили інерції, наявність механічного контакту між статором і ротором). Емерджентний ефект таких двигунів полягає в суміщенні функції двигуна з електромагнітним способом редукції швидкості і моменту, що забезпечує їх тривалу еволюцію, незважаючи на наявність суттєвих «порушень» класичних принципів електромеханічного перетворення енергії. У 2012 р., з використанням методології генетичного аналізу, було вперше здійснено розшифрування макрогенетичної програми функціонального класу, розроблено його геносистематику та створено генетичний банк з можливістю передбачення нових Видів і структур ДРК [18].

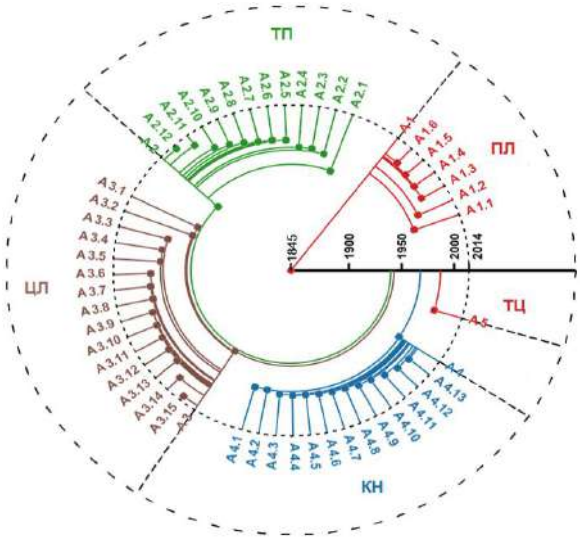


Рис. 3. Макрогенетична еволюція видової різноманітності функціонального класу ДРК (T_E = 156 років)

Ізоморфізм структурних мутацій у сучасній різноманітності технічних об'єктів досить широкий і залишається практично недослідженим. Прикладами мутованих об'єктів у технічній механіці є передачі типу «кардан» і «гнучкий вал», просторово адаптивні опори, шарнірні механізми і адаптивні підшипники, об'єкти «еластичної» механіки та ін. Результатами генетичного аналізу встановлено, що структурними еквівалентами хромосомних мутацій в ЕМ-об'єктах виступають порушення просторової або електромагнітної симетрії активних поверхонь, їх оптимальних геометричних співвідношень і пропорцій, відносної просторової орієнтації, взаємного положення або перекриття основних активних частин та ін. Переважна більшість зазначених структурних аномалій, які зберігаються та успадковуються багатьма поколіннями об'єктів електромеханіки, безпосередньо пов'язана із забезпеченням їхньої основної функції. Саме такими властивостями наділені окремі різновиди однофазних двигунів, електричні машини поступального руху, електромеханічні дезінтегратори (ЕМД), електромагнітні та електродинамічні сепаратори, самогальмівні двигуни роду конічних, двигуни і трансформатори з поворотним статором, багатостепеневі, багатороторні й багатостаторні електричні машини та ін.

Структурні аномалії можуть бути застосовані до будь-якої активної частини об'єкта (обмоток, полюсів, магнітопроводів) або об'єкта загалом (рис. 4).

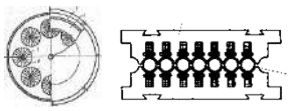
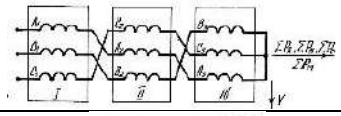
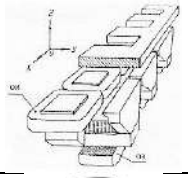
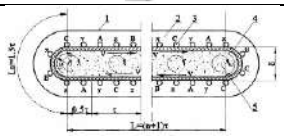
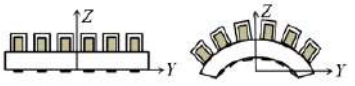
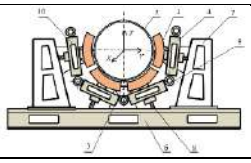
Рис. 4. Приклади мутацій зубцево-пазової структури активних частин ЕМ-об'єктів

Часткові мутації призводять до зміни окремих властивостей або функцій, а тотальні змінюють саму суть об'єкта, кардинально впливаючи на принципи його функціонування і способи технічної реалізації

Генетичне моделювання дозволяє визначити й синтезувати структурні мутації на хромосомному рівні. Структури мутованих Е-хромосом моделюються в комбінаторному просторі двох або більшої кількості генетичних операторів, які визначають рівень структурно-інформаційної складності й забезпечують необхідні адаптивні властивості ЕМ-

структури із заданою цільовою функцією. Кожній стійкій комбінації генетичних операторів, через відповідну групу математичних перетворень, ставиться у відповідність певний тип структурної організації об'єкта, який визначає генотип об'єктів-нащадків із відповідними функціональними й емерджентними властивостями (табл. 2).

Таблиця 2 – Приклади стійких комбінацій Е-хромосом за участю оператора мутації (М) в адаптивно-функціональній еволюції ЕМ-об'єктів (фрагмент генетичного банку даних)

Хромосомна комбінація*	Структурний еквівалент	Приклад з технічної еволюції
$(R \rightarrow \boldsymbol{M} \rightarrow I_R)_2$ $(I_E)_1 \times (R \rightarrow \boldsymbol{M} \rightarrow I_R)_2$	Просторові багатоелементні (модульні) композиції ($K_i \subset R^3$); Багатороторні електродвигуни з інверсією магнітного поля	
$(R \rightarrow C)_1 \rightarrow (\boldsymbol{M})_2$	Групова симетризація фазних параметрів $N = km$, (k = 1, 2, …), транспозиція	
$(R)_1 \rightarrow (\boldsymbol{M})_2$ $(R)_1 \times (\boldsymbol{M} \rightarrow R)_2$	Тягові модульні ЕМ-системи; Лінійні прискорювачі, рейкотрони; Електромагнітний транспорт (орієнтування) деталей	
$(\boldsymbol{M} \rightarrow S)_2$ $(R \rightarrow \boldsymbol{M} \rightarrow S)_2$	ДРК, Гібридні мотор-планетарні редуктори	
$(I_E)_1 \rightarrow (\boldsymbol{M} \rightarrow R)_2$ $(R \rightarrow I_E)_1 \times (\boldsymbol{M} \rightarrow R)_2$	ЕМД, Електромагнітні і електродинамічні сепаратори	
$(\boldsymbol{M_{S1}} \rightarrow \boldsymbol{M_{S2}} \rightarrow \ldots)_1 \times (S)_2$	ЕМ-модулі – трансформери зі змінною просторовою геометрією активної поверхні	
$R\ (\boldsymbol{M_{S1}} \rightarrow \boldsymbol{M_{S2}} \rightarrow \ldots)_1 \times S(\boldsymbol{M})_2$	Просторово розподілені модульні ЕМ-системи зі змінною просторовою геометрією і топологією активної поверхні	

*Індексами 1, 2 позначено первинні (батьківські) і вторинні електромагнітні хромосоми відповідно.

Хромосомно-еволюційний детермінізм за участю структурних мутацій (табл. 2) становить системну основу для створення генетичних банків даних, інформаційних баз даних і баз знань, розробки алгоритмів автоматизованого пошукового синтезу ЕМ-об'єктів з заданими адаптивними властивостями.

Магнітні мутації. Як відомо, вид мутацій в ГОС і механізми їх можливих варіацій визначаються фізичною природою мутагенів. Мутагенами називаються чинники, які викликають мутації. Мутагени можуть мати біологічне, фізичне, хімічне, соціальне, або антропогенне походження. До фізичних мутагенів належать і електромагнітні поля, структура яких в ЕМ-об'єктах, теж може бути об'єктом мутацій. Способи порушення електричної або магнітної симетрії магнітного поля, шляхом відповідного комбінування електромагнітних параметрів, узагальнюються поняттям магнітних мутацій. В ЕМ-системах магнітні мутації безпосередньо пов'язані з локальними аномаліями структури магнітного поля. Магнітні мутації реалізуються різними способами з метою забезпечення функціональної адаптації генетичної структури ЕМ-об'єктів до фенотипічних вимог їх функціонування.

До мутацій магнітного типу належать:

- способи утворення локальної асиметрії магнітного поля (із застосуванням короткозамкнених витків, локальної зміни магнітного опору, та ін.) в однофазних двигунах;

- способи утворення асиметричного обертового поля з явно вираженою локалізованою амплітудою індукції, з метою забезпечення максимальної сили одностороннього тяжіння між статором і ротором в ДРК. Локальна асиметрія результуючого поля здійснюється шляхом суперпозиції двополюсного періодичного змінного поля зі складовою магнітного поля постійного струму, або суперпозицією дво- і чотириполюсного магнітних полів;

- способи локалізації магнітної індукції в шківних магнітних сепараторах обертального типу з магнітоелектричним збудженням;

- нетрадиційні способи отримання інверсних магнітних полів в однообмоткових ЕМД для безпосереднього здійснення технологічних процесів тощо.

Для прикладу розглянемо процес адаптації структури однообмоткового індуктора, який є представником Виду плоских ЕМПЕ з генетичним кодом PL 2.0x, до реалізації функції ЕМД, які в свою чергу призначені для виробництва високоякісних гомогенних порошкових сумішей нанорозмірного діапазону. Принцип дії представників цього функціонального класу оснований на перетворенні енергії інверсних рухомих (або обертових) магнітних полів у механічну енергію вихрового (6-степеневого) руху дискретних феромагнітних частинок, які виконують функцію робочих тіл. Технологічний процес здійснюється безпосередньо в активній зоні дезінтегратора. Суттєва різниця у співвідношенні площ активних поверхонь і просторової геометрії первинної і вторинної частин ЕМД свідчить про належність ЕМД до класу ЕМ-об’єктів, функціонування яких можливе лише за умови наявності мутованої і дискретної структури вторинних робочих тіл. Але батьківська електромагнітна хромосома *PL 2.0x,* структурним еквівалентом якої є розподілена трифазна обмотка кільцевого типу, не належить до генетичної програми функціонального класу однообмоткових ЕМД, оскільки не забезпечує інверсію рухомих магнітних полів. Результати генетичного моделювання показують, що ця проблема вирішується використанням оператора реплікації магнітної системи індуктора (двопакетний магнітопровід) та застосуванням комбінованої мутації його кільцевої обмотки шляхом:

1) просторової деформації: поздовжнього зсуву активних частин секцій обмотки на кут $\alpha = arctg\ \delta/\tau$, де δ – міжіндукторний немагнітний зазор, τ – довжина полюсного поділу (структурна мутація M_{OX});

2) зміни порядку чергувань фазних зон одного з індукторів на циклічну послідовність A-z-B-z-A-z-B-z-A-… (магнітна мутація M_V).

Зазначеним умовам функціонування відповідає синтезована хромосома C_{612}, генетична інформація якої задовольняє вимогам інтегральної функції синтезу, а її структурна формула набуває вигляду

$$C_{612} = [(PL\ 2.0x):M_{OX}:M_V]_1 \times [(ЦЛ\ 2.2x):R_n:M]_2 \subset S_{PL20x} \quad (1)$$

Породжувальній хромосомі C_{612} ставиться у відповідність структура ЕМД, яка задовольняє інтегральній сукупності вимог його функціонування (рис. 5).

Мутації магнітного типу виконують адаптивну функцію і в комбінації з іншими генетичними операторами синтезу можуть утворювати неочікувані електромагнітні ефекти та структурні варіації, виступаючи джерелом синтезу нетрадиційних структур і оригінальних технічних рішень.

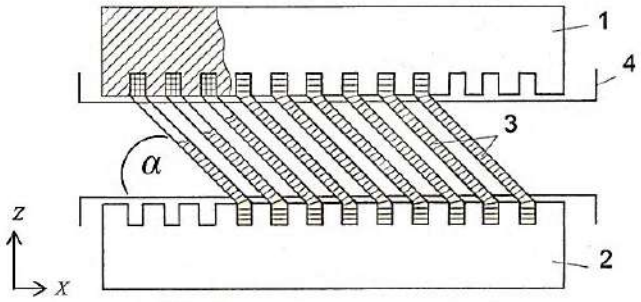


Рис. 5. Синтезована структура однообмоткового ЕМД (хромосома C_{612}) зі структурно-магнітною мутацією активної зони: 1, 2 – пакети плоских магнітопроводів, 3 – кільцева розподілена обмотка, 4 – робоча камера

Генетичне передбачення і синтез міжродових мутацій. Одна із сучасних тенденцій у розвитку мобільних технічних систем пов'язана з переходом від класичних жорстких форм і моноструктур до просторово розподілених структур з адаптивною просторовою геометрією і топологією, функціонування яких максимально наближено до природних аналогів. Аналіз функціонально-технічної еволюції ЕМПЕ свідчить, що на даний час існує велика різноманітність електричних машин і електромеханічних пристроїв, функціонування яких безпосередньо пов'язано зі зміною структури і геометрії їхньої активної зони як у просторі, так і в часі. У концепції структурно-системного підходу зазначені ЕМ-об'єкти належать до класу генетично мутованих, різноманітність яких визначається відповідними генетичними програмами, а їх функціональна еволюція вже триває протягом 75 років (рис. 6).

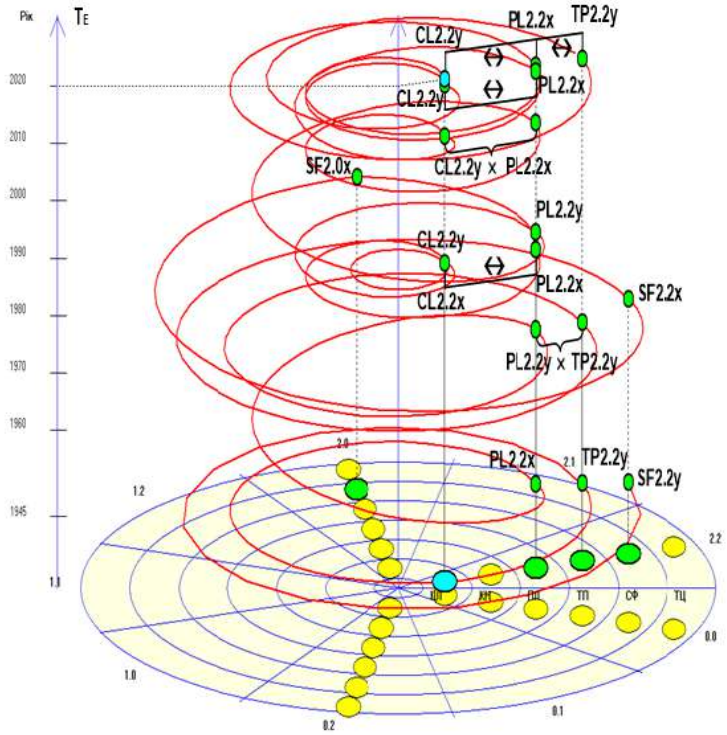


Рис. 6. Генетична еволюція ЕМПЕ з просторовими мутаціями активної зони (T_E = 75 років)

За результатами аналізу генетичних програм структуроутворення об’єктів просторово адаптивної електромеханіки, авторами відкрито новий механізм структурних мутацій, який відповідає статусу мутацій міжродового і міжвидового рівнів. В основі топологічної інваріантності різних класів множин матричних просторів лежить теорема Лаврентьєва-Зорича про глобальний гомеоморфізм [19]. Математичну основу такого виду мутацій становить груповий гомеоморфізм Е-хромосом, який визначає інваріантні властивості елементно-інформаційного базису відповідних підгруп періодичної структури ГК.

Принцип міжродової мутації пов’язаний зі зміною лише першої складової генетичного коду гомологічної Е-хромосоми, що вказує на відповідну зміну родової належності ЕМ-структури, породжуючи послідовність структур з варіативною просторовою геометрією, у межах топологічного простору відповідної підгрупи R^T:

$$M_G \rightarrow (S_{M1}, S_{M2}, \ldots, S_{Mn}) \subset R^T. \quad (2)$$

Найвищим рівнем просторової адаптивності наділені електромагнітно несиметричні хромосоми підгруп 2.2*x* і 2.2*y*. Наприклад, у межах підгрупи 2.2*y* просторова геометрія Е-хромосом пов’язана відношенням групового гомеоморфізму в евклідовому просторі R^3:

$$H_{22y} = (CL2.2y \leftrightarrow KN2.2y \leftrightarrow PL2.2y \leftrightarrow TP2.2y \leftrightarrow SF2.2y \leftrightarrow TC2.2y \leftrightarrow\ldots) \subset R^3, \quad (3)$$

або в символьному поданні:

$$H_{22y} = (CL \leftrightarrow KN \leftrightarrow PL \leftrightarrow TP \leftrightarrow SF \leftrightarrow TC \leftrightarrow\ldots)2.2y \subset R^3. \quad (4)$$

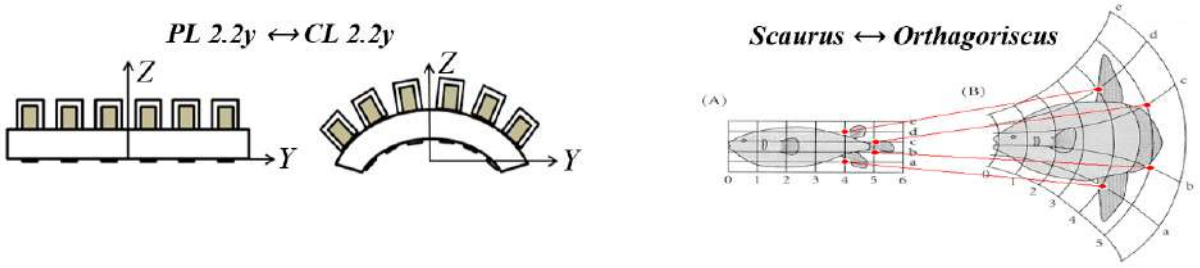
Топологічно-еквівалентні перетворення за моделлю (3, 4) породжують множину Е-хромосом в межах горизонтального гомологічного ряду, які відрізняються лише першою складовою генетичної інформації в структурі їх універсальних генетичних кодів. В прикладних задачах генетичного синтезу, оператору мутації M_G ставиться у відповідність група неперервних просторових деформацій – стиснення, розтягу, зсуву, повороту, кручення та ін.

Важливою властивістю горизонтальних гомологічних рядів є також їх прогностична функція. Так як довільний одиничний ЕМ-об'єкт є структурним представником певного гомологічного ряду, то за генетичною інформацією об'єкта, в періодичній структурі ГК, визначається структура «ідеального» гомологічного ряду, генетичні коди структурних представників якого виконують роль інтелектуальних підказок в задачах передбачення і спрямованого синтезу об'єктів-гомологів, ще відсутніх на даний час еволюції досліджуваного класу. Результати передбачення відкрили можливість створення нових класів модульних ЕМ-об’єктів з 2D- і 3D-просторовою адаптацією активної зони, шляхом керованої зміни просторової геометрії активної поверхні в процесі їх функціонування (рис. 7) [20].

Рис. 7. Багатофункціональний індукторний модуль із просторово адаптивною активною поверхнею (результат синтезу міжродової хромосомної мутації (PL2.2y ↔ CL2.2y)

На топологічну природу просторової трансформації в морфогенезі біологічних Видів уперше звернув увагу шотландський біолог і математик Д’Арсі Томпсон [21]. Він вперше описав перехід від морфології окремих біологічних Видів до іншого, простою

деформацією двовимірного простору (рис. 8, *б*). Ізоморфізм топологічних моделей у біологічному й електромеханічному видоутворенні засвідчує системну природу міжвидової трансформації в межах відповідних горизонтальних гомологічних рядів (рис. 8, *а, б*), яка визначається принципом топологічної інваріантності гомологічних хромосом.



а *б*

Рис. 8. Прояви принципу топологічної інваріантності в межах горизонтальних гомологічних рядів: а – в електромеханіці (V. Shynkarenko); б – у біології (D'Arcy Thompson)

Ізоморфізм принципу топологічної інваріантності в межах горизонтальних гомологічних рядів в біології і електромеханіці вказує на системну природу міжродових мутацій, що є черговим підтвердженням гіпотези множинності періодичних породжувальних систем різної генетичної природи [22].

Найбільшу практичну цінність мають міжродові хромосомні мутації в межах групи 2.2, генетична схильність яких максимально чутлива як до зміни просторової орієнтації активних частин, так і до зміни геометрії активної поверхні. Зазначені просторові трансформації встановлюють детермінований зв'язок мутованих Е-хромосом з просторовою геометрією активної поверхні і видом просторового руху об'єктів-нащадків (табл. 3).

Таблиця 3 – Взаємозв'язок міжродових хромосомних мутацій з 2D-геометрією активної поверхні й видом просторового руху ЕМ-об'єктів-нащадків модульного типу (підгрупа 2.2y першого великого періоду ГК)

Міжродова хромосомна мутація	Вид просторової деформації	Структурна формула мутованої хромосоми	Вид просторового руху
$PL \leftrightarrow CL$	M_{OY}	$2.2y(PL \leftrightarrow CL)_1$	Поступальний (V_{OX}) ↔ обертальний (ω_{OY})
$PL \leftrightarrow TP$	M_{OZ}	$2.2y(PL \leftrightarrow TP)_1$	Поступальний (V_{OX}) ↔ обертальний (ω_{OZ})
$PL \leftrightarrow SF$	$(M_{OY} \leftrightarrow M_{OX})_R$	$2.2y(PL \leftrightarrow SF)_1$	Поступальний (V_{OX}) ↔ обертальний (ω_{OY})
$CL \leftrightarrow SF$	M_{OX}	$2.2y(CL \leftrightarrow SF)_1$	Обертальний (ω_{OY})
$PL \leftrightarrow KN$	$M_{OZ} \leftrightarrow M_{OY}$	$2.2y(PL \leftrightarrow KN)_1$	Поступальний (V_{OX}) ↔ обертальний (ω_{OY})
$TP \leftrightarrow KN$	M_{OY}	$2.2y(TP \leftrightarrow KN)_1$	Обертальний (ω_{OZ}) ↔ (ω_{OY})
$CL \leftrightarrow KN$	M_{OZ}	$2.2y(CL \leftrightarrow KN)_1$	Обертальний (ω_{OY})
$KN \leftrightarrow SF$	$(M_{OX} \leftrightarrow M_{OY})_R$	$2.2y(KN \leftrightarrow SF)_1$	Обертальний (ω_{OY})
$TP \leftrightarrow SF$	$(M_{OX} \leftrightarrow M_{OY})_R$	$2.2y(TP \leftrightarrow SF)_1$	Обертальний (ω_{OZ}) ↔ (ω_{OY})
$CL \leftrightarrow TP$	$M_{OY} \leftrightarrow M_{OZ}$	$2.2y(CL \leftrightarrow TP)_1$	Обертальний (ω_{OY}) ↔ (ω_{OZ})
$CL \leftrightarrow TC$	$[M_{OY} \leftrightarrow (M_{OX})_{R1} \leftrightarrow (M_{OZ})_{R2}]$, де $(R_2 > R_1)$	$2.2y(CL \leftrightarrow TC)_1$	Обертальний (ω_{OY}) ↔ (ω_{OZ})
$PL \leftrightarrow TC$	$[(M_{OX})_{R1} \leftrightarrow (M_{OZ})_{R2}]$, де $(R_2 > R_1)$	$2.2y(PL \leftrightarrow TC)_1$	Поступальний (V_{OX}) ↔ обертальний (ω_{OZ})
$KN \leftrightarrow TC$	$[(M_{OZ})_{R2} \leftrightarrow (M_{OX})_{R1}]$, де$(R_2 > R_1)$	$2.2y(KN \leftrightarrow TC)_1$	Обертальний (ω_{OY}) ↔ (ω_{OZ})
$SF \leftrightarrow TC$	$[(M_{OX})_{R1} \leftrightarrow (M_{OZ})_{R2}]$, де $(R_2 > R_1)$	$2.2y(SF \leftrightarrow TC)_1$	Обертальний (ω_{OY}) ↔ (ω_{OZ})

Якщо об'єкти класичної електромеханіки створюються за принципом збереження геометричної еквідистантності їхніх активних частин для реалізації відповідного виду просторового руху, то об'єкти просторово адаптивної електромеханіки (табл. 3) наділені можливістю керованої зміни просторової геометрії активної зони з одночасною зміною виду просторового руху, залежно від морфології і електромагнітних властивостей об'єктів технологічного процесу. У просторово розподілених ЕМ-системах на основі адаптивних модулів відкривається можливість також змінювати топологію просторової активної поверхні, що дозволяє здійснювати енергоощадні процеси керування.

Систематизовану інформацію, яку представлено в табл. 3, можна розглядати як системну основу генетичного структуроутворення модульних об'єктів просторово адаптивної електромеханіки, розробки алгоритмів інноваційного синтезу їхніх структурних композицій і генерації оригінальних технічних рішень.

Висновки. Результати структурно-системних досліджень хромосомних мутацій в ЕМ-системах можна узагальнити наступними основними положеннями:

1. Мутації є одним з найбільш поширених і продуктивних механізмів адаптивної еволюції генетично організованих систем як біологічного, так і антропогенного походження.
2. На відміну від мутацій біологічного походження, структурні мутації об'єктів електромеханіки, незважаючи на наявність певних порушень принципів електромеханічного перетворення енергії, у переважній більшості, забезпечують реалізацію основної функції ЕМ-об'єктів.
3. Структурні й магнітні мутації необхідно розглядати як один із ефективних напрямів адаптивного структуроутворення ЕМ-об'єктів.
4. В еволюції об'єктів техніки джерелом генерації нетрадиційних структурних варіацій і електромагнітних ефектів, які забезпечують широкий діапазон адаптивної мінливості технічних рішень, виступають результати творчої діяльності дослідника, які в інтеграції з хромосомними мутаціями набувають передбачуваного характеру.
5. У структурах ЕМ-об'єктів мутації утворюють стійкі комбінації з іншими принципами внутрішньовидового генетичного структуроутворення – реплікацією, схрещуванням, інверсією і кросинговером, що відкриває можливість розробки алгоритмів інноваційного синтезу.
6. З використанням технології генетичного передбачення, вперше відкрито механізм міжродових мутацій, який визначає принципи структуроутворення нових поколінь модульних ЕМ-об'єктів з 2D- і 3D-просторовою адаптацією активної зони.
7. Стійкість і тривалість мутагенезу в конкурентній технічній еволюції ЕМ-об'єктів визначається рівнем емерджентності мутованої структури і регулюються в ряду поколінь техніко-економічним відбором.
8. Структурні і магнітні мутації моделюються на рівні електромагнітних хромосом (первинних джерел електромагнітного поля);
9. Генетична схильність Е-хромосом до мутацій визначається їх гомеоморфізмом у межах відповідних горизонтальних гомологічних рядів;
10. Математичною основою методів генетичного синтезу міжродових мутацій виступає група топологічно-еквівалентних просторових перетворень (зсуву, розтягу, стиснення, повороту, кручення та ін.) щодо довільної гомологічної хромосоми.

Генетичні принципи адаптивного структуроутворення на основі принципу мутацій, у поєднанні з когнітивними механізмами мислення людини-дослідника, є ефективним способом виходу за межі тривіального мислення і невичерпним джерелом генерації но-

вих ідей, неочікуваних структурних композицій і оригінальних технічних рішень. Мутаційні процеси безпосередньо пов'язані з виникненням стійких емерджентних ефектів, які створюють передумови розробки нових поколінь об'єктів техніки.

Результати цього дослідження засвідчують, що фундаментальні положення теорії генетичної еволюції ламають існуючі стереотипи, стосовно суто біологічної природи генетичних принципів структуроутворення, відкриваючи можливість переходу від стереотипів вузькодисциплінарного підходу до системної стратегії генетичного синтезу на принципах гармонійного співіснування людини природи і техніки. Незнання або свідоме ігнорування системних принципів генетичного структуроутворення, призводить до суттєвих втрат часових і матеріальних ресурсів, створення неконкурентоспроможних систем або систем, які з часом входять в екологічний конфлікт з довкіллям.

Список використаних джерел

1. Урманцев Ю. А. Эволюционика, или общая теория развития систем природы, общества и мышления / Ю. А. Урманцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 240 с.

2. Князева Е. Н. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов. – М. : Наука, 1994. – 236 с.

3. Эбелинг В. Физика процессов эволюции. Синергетический подход : пер. с нем. / В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель ; пер. с нем. Ю. А. Данилова. – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – 328 с.

4. Шинкаренко В. Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем / В. Ф. Шинкаренко. – К. : Наукова думка, 2002. – 288 с.

5. Брюхович Е. И. Биогенетический закон Геккеля и его роль в выявлении механизма ретрансляции естественных законов в процессе создания и эволюционирования вычислительной техники. Ч. 2 / Е. И. Брюхович // Математичні машини і системи. – 2010. – № 4. – С. 169-180. – Режим доступу: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/83387

6. Бушуев В. В. Космос и Земля. Электромеханические взаимодействия / В. В. Бушуев, И. П. Копылов. – М. : ИАЦ Энергия, 2005. – 176 с.

7. Shendure J. The origins, determinants, and consequences of human mutations [Electronic resource] / Shendure J., Akey J. M. // Science. – 2015. – Vol. 349, No. 6255. – Pp. 1478–1483. – Access mode : https://doi.org/10.1126/science.aaa9119.

8. Holmes B. Language 'mutations' affect least-used words / Bob Holmes // NewScientist. – Access mode: https://www.newscientist.com/article/dn12772-language-mutations-affect-least-used-words/. – Access date : 11 жовтня 2007. – Screen name.

9. Мышинский Г. В. Низкоэнергетическая трансмутация атомных ядер химических элементов. Распределение по элементам в продуктах трансмутации. Нуклеосинтез / Г. В. Мышинский, В. Д. Кузнецов, Ф. М. Пеньков // Журнал Формирующихся Направлений Науки. – 2017. – Т. 5, № 17–18. – С. 61–81. – Режим доступу: http://www.unconv-science.org/n17/myshinskiy2.

10.Лисовицкий В. М. Методологический принцип междисциплинарности в истории экономической науки / В. М. Лисовицкий // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Економічна», 2018. – Вип. 95. – С. 16–22. – Режим доступу: https://doi.org/10.26565/2311-2379-2018-95-02.

11.Fukuyama Fr. The Origins of Political Order: From Prehuman Times to the French Revolution / Francis Fukuyama. – New York : Farrar, Straus and Giroux, 2011. – 608 p.

12.Zhu Z. Research on Evolution Mechanism of Technological Original Innovation – With Mutation Theory of Respective / Z. Zhu, J. Li, T. Chen // Journal of Service Science and Management, 2012. – Vol. 5, No. 1. – Pp. 28–36. – Access mode: https://doi.org/10.4236/jssm.2012.51004.

13.Project Management Stage Mutations within Agile Methodological Framework Process Transformations / Markopoulos E., Bilbao J., Bravo E., Stoilov T., Vos T., Talamanca C., Reschwamm K. // WSEAS Transactions on Information Science & Applications. – 2008. – Vol. 5, Is. 5. – Pp. 776–785. – Access mode: https://www.academia.edu/6874971.

14.Лима-де-Фариа А. Эволюция без отбора: Автоэволюция формы и функции : пер. с англ. / А. Лима-де-Фариа ; пер. с англ. Е. Б. Кофмана, Н. О. Фоминой ; под ред. Л. И. Корочкина – М. : Мир, 1991. – 455 с.

15. Коряков Д. Е. Хромосомы. Структура и функции / Д. Е. Коряков, И. Ф. Жимулев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 258 с.

16.Шинкаренко В. Ф. Словник із структурної і генетичної електромеханіки / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Шиманська. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 112 с.

17.Laithwaite E. R. A History of Linear Electric Motors / E. R. Laithwaite. – London : Macmillan, 1987. – 389 p.

18.Генетическая программа структурной эволюции электродвигателей с катящимся ротором / В. Ф. Шинкаренко, В. В. Наний, В. В. Котлярова, А. А. Дунев // Електротехніка та електроенергетика, 2012. – № 2. – С. 42-48.

19. Зорич В. А. Теорема М. А. Лаврентьева о квазиконформных отображениях пространства / В. А. Зорич // Математический сборник. – 1967. – Т. 74(116), № 3. – С. 417–433.

20.Genetic Organization and Evolution of Electromechanical Objects with Adaptive Geometry of Active Zone / V. Shynkarenko, A. Makki, V. Kotliarova, A. Shymanska, P. Krasovskyi // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. Special Issue on Multidisciplinary Innovation in Engineering Science & Technology. – 2020. – Vol. 5, No. 5. – Pp. 512–525. – Access mode: https://doi.org/10.25046/aj050564.

21. Витковски Н. Сентиментальная история науки : пер. с фр. / Н. Витковски ; пер. с фр. Д. Баюка. – М. : КоЛибри, 2007. – 448 с.

22. Шинкаренко В. Ф. Изоморфизмы порождающих систем (на примере электромагнитной и числовой) / В. Ф. Шинкаренко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2019. – № 1(45).– С. 46–55. – Режим доступу : https://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.46-55.

References

1. Urmantcev, Iu.A. (2009). *Evoliutcionika, ili obshchaia teoriia razvitiia sistem prirody, obshchestva i myshleniia [Evolution, or general development theory of nature`s systems, society and mindset]*. Knizhnyi dom «LIBROKOM».

2. Kniazeva, E. N., & Kurdiumov, S. P. (1994). *Zakony evoliutcii i samoorganizatcii slozhnykh sistem [Laws of evolution and complex systems self-organization]*. Nauka.

3. Ebeling, V., Engel, A., & Faistel, R. (2001). *Fizika protcessov evoliutcii. Sinergeticheskii podkhod [Physics of evolutionary processes. Synergistic approach : translated from German]*. Editorial URSS.

4. Shynkarenko, V.F. (2002). *Osnovy teorii evoliutsii elektromekhanichnykh system [Fundamentals of the Electromechanical Systems Evolution Theory]*. Naukova dumka.

5. Briukhovich, E. I. (2010). Biogeneticheskii zakon Gekkelia i ego rol v vyiavlenii mekhanizma retransliatcii estestvennykh zakonov v protcesse sozdaniia i evoliutcionirovaniia vychislitelnoi tekhniki. Ch. 2. [Haeckel`s biogenetic law and it role in identifying the mechanism of retransmission of natural laws in the process of creation and evolution of computer technology. Part 2.]. *Matematichni mashini i sistemi – Mathematical machines and systems*, (4), 169–180. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/83387.

6. Bushuev, V.V., & Kopylov, I.P. (2005). *Kosmos i Zemlia. Elektromekhanicheskie vzaimodeistviia [Space and Earth. Electromechanical interaction]*. IATc Energiia.

7. Shendure, J., & Akey, J.M. (2015). The origins, determinants, and consequences of human mutations. *Science*, *349*(6255), pp. 1478–1483. https://doi.org/10.1126/science.aaa9119

8. Holmes, B. (2007, October 11). *Language 'mutations' affect least-used words*. NewScientist. https://www.newscientist.com/article/dn12772-language-mutations-affect-least-used-words/

9. Myshinskii, G.V., Kuznetcov, V.D., & Penkov, F.M. (2017). Nizkoenergeticheskaia transmutatciia atomnykh iader khimicheskikh elementov. Raspredelenie po elementam v produktakh transmutatcii. Nukleosintez [Low-energy transmutation of atomic nuclei of chemical elements. Distribution by elements in transmutation probes. Nucleosynthesis]. *Zhurnal Formiruiushchikhsia Napravlenii Nauki – Journal of Formative Directions of Science*, *5*(17–18), 61–81. http://www.unconv-science.org/n17/myshinskiy2/

10.Lisovitckii, V.M. (2018). Metodologicheskii printcip mezhdistciplinarnosti v istorii ekonomicheskoi nauki [Methodological principle of interdisciplinarity in the history of economic science]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Seriia «Ekonomichna» – Transactions of Kharkiv national university named after V.N. Karazin. Series «Economics»*, (95), 16–22. https://doi.org/10.26565/2311-2379-2018-95-02.

11.Fukuyama, Fr. (2011). *The Origins of Political Order: From Prehuman Times to the French Revolution*. Farrar, Straus and Giroux.

12.Zhu, Z., Li, J., & Chen, T. (2012). Research on Evolution Mechanism of Technological Original Innovation—With Mutation Theory of Respective. *Journal of Service Science and Management*, *5*(1), 28–36. https://doi.org/10.4236/jssm.2012.51004.

13.Markopoulos, E., Bilbao, J., Bravo, E., Stoilov, T., Vos, T., Talamanca, C., & Reschwamm, K. (2008). Project Management Stage Mutations within Agile Methodological Framework Process Transformations. *WSEAS Transactions on Information Science & Applications*, *5*(5), 776–785. https://www.academia.edu/6874971.

14.Lima-de-Faria, A. (1991). *Evoliutciia bez otbora: Avtoevoliutciia formy i funktsii [Evolution without selection. Autoevolution of form and function : translated from English]*. Mir.

15.Koriakov, D. E., & Zhimulev, I. F. (2009). *Khromosomy. Struktura i funktcii [Chromosome. Structure and functions]*. Izd-vo SO RAN.

16.Shynkarenko, V.F., & Shymanska A.A. (2015). *Slovnyk iz strukturnoi i henetychnoi elektromekhaniky [Electromechanical structural and genetic dictionary]*. NTUU «KPI».

17.Laithwaite, E. R. (1987). *A History of Linear Electric Motors*. Macmillan.

18.Shinkarenko, V.F., Nanii, V.V., Kotliarova, V.V., & Dunev, A.A. (2012). Geneticheskaia programma strukturnoi evoliutcii elektrodvigatelei s katiashchimsia rotorom [The genetic program of the structural evolution of electric motors with a rolling rotor]. *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka – Electrical engineering & power engineering*, (2), 42–48.

19.Zorich, V.A. (1967). Teorema, M. A. Lavrenteva o kvazikonformnykh otobrazheniiakh prostranstva [The quasi-conformal space mapping M. A. Lavrentev`s theorem]. *Matematicheskii sbornik – Mathematical proceedings*, *74(116)*(3), 417-433.

20.Shynkarenko, V., Makki, A., Kotliarova, V., Shymanska, A., & Krasovskyi, P. (2020). Genetic Organization and Evolution of Electromechanical Objects with Adaptive Geometry of Active Zone. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. Special Issue on Multidisciplinary Innovation in Engineering Science & Technology*, *5*(5), 512–525. https://doi.org/10.25046/aj050564

21.Vitkovski, N. (2007). *Sentimentalnaia istoriia nauki : per. s fr. [Sentimental history of science : translated from French]*. KoLibri.

22.Shinkarenko, V.F. (2019). Izomorfizmy porozhdaiushchikh sistem (na primere elektromagnitnoi i chislovoi) [Isomorphisms of generative systems (based on the examples of electromagnetic and numeric)]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, *1*(45), 46–55. https://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.46-55.

Отримано 05.05.2022

UDC 621.313

Vasyl Shynkarenko[1], Viktoriia Kotliarova[2], Yevhen Monakhov[3], Pavlo Krasovskyi[4]

[1]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
ResearcherID: AAK-3777-2020. **SCOPUS Author ID:** 7005550726

[2]Senior Lecturer at the Department of Electromechanics
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: sharik_2004@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-4182-4175
ResearcherID: AAK-3782-2020. **SCOPUS Author ID:** 57202578038

[3]PhD in Engineering Sciences, R&D Director
Zhuji Heist Motors CO., LTD (Zhuji, China)
E-mail: emonachov@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-8408-8051
ResearcherID: AAK-3885-2020. **SCOPUS Author ID:** 57191825945

[4]Postgraduate Student at the Department of Electromechanics
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: krasovskyipav@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-4757-9879
SCOPUS Author ID: 57219491120

STRUCTURAL MUTATIONS IN ADAPTIVE EVOLUTION OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS

COVID-19 pandemic that involved almost whole world doesn't call any doubts to anyone that humankind`s fate is determined at present and future times by level of knowledge and technologies which have ability to recognize properties and define laws of variability of elemental genetic chromosome level. Humankind stands at the doorstep to a genomic era. Significant achievement of the science in the new period became the awareness that inheritance principles and genetic evolution laws are not prerogative just for live nature systems, but have general systematic character. Structural diversity and evolution of genetically organized systems with different physical nature which variety (spectrum) spread from space, through chemical, biologic to social and anthropogenic systems are defined through own element informational basis and general systematic principles of inherited forming structure. Cognition of genetic principles of structural organization is key in concept of harmonic coexistence of mankind, nature and technology.

The term mutation in modern science has come out of the limits of biology and became a research object in chemistry, linguistics, musical theory, mathematics, computing machinery, architecture, sociology and political science, project management and other scientific subjects. Nevertheless, in the technical sciences level of knowledge and genomic-evolutionary research is being at initial stage. Therefore, one of the most important systematical research directions is cognition of evolutionary processes of genetic structural forming and structural variability of technical objects, that open route to strategy of genetic foreseeing and interdisciplinary synthesis of complex systems with different genetic nature components.

This article is dedicated to systematic analysis of structural mutagenesis – one of the most productive and less studied process in innovative structure forming and evolution of electromechanical objects.

In accordance to fundamental notion of electromagnetic chromosome, the primary source of electromagnetic field, genetic information and universal genetic code which unambiguously determined by its position in periodic structure of genetic classification is set. Electromagnetic chromosomes fulfill role of output holistic elements in genetic structure forming of electromechanical objects and higher complexity level systems. The determined informational interrelation of primary electromagnetic field sources and complexity level of electromechanical objects is shown. Electromagnetic, topological and geometrical properties of electromagnetic chromosomes which are defined by general systematic principles of electric charge conservation, electromagnetic symmetry, topology and generalized by terms of genetic information are analyzed. The classification of main variety of electromagnetic chromosomes is given. It is shown, that chromosome mutation is one of the most productive direction in heritable variety of structures, that are responsible for saving and transferring genetic information in a number of generations of electromechanical objects. It is defined that steadfast combination of genetic synthesis operators with participation of chromosome mutation, which are used in technical evolution of functional classes of electromechanical objects. In accordance to term of structural mutation, the violation of optimal geometrical ratios and proportions, relative orientation, position in space or overlapping of active parts are set. The term of magnetic mutation that are caused by local violation of magnetic field symmetry, namely combining of corresponding electromagnetic parameters is introduced and generalized. It is shown that electromagnetic chromosome`s predisposition to structural mutation is determined by topological properties of electromagnetic chromosome within corresponding subgroups in periodic structure of its genetic classification. By using the genetic foreseeing technology, for the first-time discovered mutations of interspecific and intergeneric levels, which are define existence limits and principles of electromechanical object`s genetic synthesis with 2D- and 3D-space active zone adaptation. The mutation structure forming processes are initiated by human and perform adaptive function that accompanied by gaining corresponding emergent effect.

Keywords: *electromechanical objects; genetic evolution; system isomorphs; electromagnetic chromosome; genetic code; theory of chromosome structure formation; chromosome mutation; adaptation.*

Table: 3. Fig.: 8. References: 22.

Шинкаренко В., Котлярова В., Монахов Є., Красовський П. Структурні мутації в адаптивній еволюції електромеханічних перетворювачів енергії. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 111-126.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-127-137
УДК 681.5:004.51

Володимир Войтенко[1], Максим Солодчук[2]

[1]кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, робототехніки, автоматики та мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: v.voytenko@stu.cn.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1490-0600
ResearcherID: F-8698-2014. **Scopus Author ID:** 36167678700

[2]начальник відділу
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння
та військової техніки (Чернігів, Україна)
E-mail: rocket15733@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1162-6784

ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ ІЗ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Проведення тривалих пошуково-рятувальних місій, які здійснюються за допомогою безпілотних літальних апаратів, перевантажують оператора. Запропонована концепція підвищення швидкодії людино-машинної системи на основі інформації, отримуваної із зображень відеокамер, встановлених на рухомій відносно апарату платформі, за рахунок інтелектуальної системи керування цією платформою. Позиціювання окремої спот-камери за кутами рискання та тангажу за зонами реалізуються на основі команд від підсистеми розпізнавання, яка визначає кандидатів на об'єкти інтересу.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат; відеосенсор; аналіз зображень; людино-машинна система; електропривід; MATLAB; Simulink.*

Рис.: 7. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є одним із найбільш ефективних способів отримання інформації про властивості порівняно великих за обсягом площ земної поверхні та розташованих на ній об'єктів. Ця інформація стає доступною за результатами вимірювань, які здійснюються, зокрема, за допомогою отримання цифрового зображення, тобто прямокутного масиву відліків інтенсивності (колірності) видимого світла, відбитого від об'єкта. Зображення з первинних перетворювачів (сенсорів), які встановлені на БПЛА, за допомогою радіоканалу передаються до віддаленого центру керування, або знімаються безпосередньо з апарату після завершення місії і, в кінцевому випадку, відтворюються на екрані відеомонітора. Оператор є ланкою контуру керування системою найвищого рангу; спираючись на результати аналізу зображення, оператор приймає рішення та ініціює подальші дії відповідно до цільового призначення. Оскільки часовий проміжок, який проходить з моменту появи на зображенні шуканого об'єкта до релевантної реакції оператора, є ключовим параметром, що визначає якість цієї системи, мінімізація часу прийняття рішення оператором є актуальною задачею.

Постановка проблеми. У загальному випадку зображення може бути сформоване за рахунок упорядкування інформації про інтенсивність електромагнітного чи іншого випромінювання в різних діапазонах (видимому, інфрачервоному, ультрафіолетовому, радіо та ін.), що прийшло з цього напрямку. У БПЛА найчастіше для створення зображення використовують або відеокамеру з високою роздільною здатністю, яка працює у видимому чи інфрачервоному діапазоні [1], або блок таких камер, установлених чи безпосередньо на БПЛА, чи на рухому відносно БПЛА платформу [2; 3].

Проблема полягає в тому, що оскільки час перебування БПЛА в польоті обмежений, а площа поверхні, яка підлягає дослідженню за цей час, має бути щонайбільшою, швидкість руху апарату є великою, і це призводить до наближення або, навіть, перевищення інформаційним потоком з екрана відеомонітора пропускної спроможності людини-оператора. Це може спричинити пропуск цілі, що не є припустимим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [4] зазначено, що вдосконалення безпілотних авіаційних комплексів (БПАК), підвищення тривалості польоту БПЛА, розширення діапазонів та способів зняття інформації про об'єкти призвело до значного збільшення навантаження на екіпажі БПАК, вплинуло на підвищення вимог (критеріїв) до їх відбору, збільшило час їхнього навчання, у тому числі як дешифрувальників. При цьому відзначаються такі аспекти.

© Войтенко В. П., Солодчук М. О., 2022

1. Найбільша втомлюваність операторів і пов'язані з нею проблеми ідентифікації об'єктів відбуваються під час виконання повторюваних та довготривалих місій за сталим маршрутом. Така робота потрібна для виявлення змін стану об'єктів на досліджуваній ділянці поверхні або для поповнення недоотриманої раніше інформації, що може бути викликане багатьма причинами (наприклад, неточний маршрут при застосуванні інерціальної системи навігації).

2. Великий час на постобробку візуальної інформації, яка виконується не в реальному часі, а після завершення місії. Це – підготовка звітів, які використовуються в роботі інстанцій вищого рівня і включають, зокрема, невелику кількість відібраних якісних зображень з доданою до них телеметричною та аналітичною інформацією.

3. Проблеми, пов'язані з необхідністю зменшення ширини полоси сигналу, що передається з БПЛА [5].

Для вирішення певних задач використовуються телевізійні камери високої просторової та спектральної розділової здатності. Мультиспектральна камера SlantRange 4P+ [6] за висоти зйомки 100 м та швидкості БПЛА 12 м/с, наприклад, забезпечує просторову розділову здатність у 2 см на піксель. Фокусна відстань об'єктива становить 16 мм, крок пікселів – 3,45 мкм, фокальна площина – 7,07×5,30 мм^2, формат зображення – 2048×1536 пікселів за частоти кадрів 0,8 Гц [7]. Виробник наводить інформацію про розміри ділянки земної поверхні, а також рекомендовану максимальну швидкість руху БПЛА залежно від висоти польоту апарату, щоб не допустити зменшення розділової здатності внаслідок розмиття зображення.

Важливі переваги надає наявність масштабування зображення, насамперед оптичного. Так, блок відеокамери FCB-9500 [1] містить об'єктив зі змінюваною фокусною відстанню (від 6,5 до 162,5 мм) та діафрагмовим числом (від 1,6 до 4,8), забезпечуючи збільшення зображення в M = 30 разів. Час переходу від ширококутного до телеогляду становить 2,9 с. Вбудований процесор цифрової обробки зображень дозволяє одночасно підлаштовувати фокусування, проте в цьому випадку зміна фокусної відстані займає вже 4,8 с. Додавання наявного електронного 12-кратного масштабування збільшує час масштабування до 6,1...6,4 с (залежно від частоти кадрової розгортки). Суто цифрове збільшення реалізується за 1,4...1,6 с. У цій камері використовується власний алгоритм автофокусування Sony, який, на відміну від звичайних камер, дозволяє одночасно і масштабувати, і фокусувати зображення у складних умовах, особливо в темному середовищі (включаючи суміш видимих та інфрачервоних променів і наявність локальних потужних джерел світла). Функція інфрачервоної корекції виконує операцію швидкого фокусування за допомогою двох кривих фокусування, які відповідають кольоровому режиму та інфрачервоному режиму відповідно. Час фокусування з нескінченості до найближчої дистанції становить 1,4 с.

У візуальному оптронному сенсорі HENSOLDT VOS [8] використовується ступеневе масштабування з чотирма попередньо встановленими рівнями та 12-кратним максимальним збільшенням. Незважаючи на світлочутливу матрицю з 4 К пікселями, розділова здатність за достатньої для передавання рухомого зображення швидкості частотою кадрів (39 Гц) становить тільки 512×512 елементів.

На рухомій платформі Goshawk-II [9] використовується камера HD Hitachi DI-SC220 [10] з безперервним 19-кратним оптичним та двоступеневим (2x та 4x) цифровим масштабуванням. Більш просунута модель ARGOS-II [11] дозволяє збільшувати зображення у M = 20 разів, а швидкість керування поворотом платформи сягає 60°/с.

Лінійка мультиспектральних відеосистем на рухомих платформах L3 HARRIS WESCAM MX [12] містить великий набір сенсорів для різноманітних застосувань. Оптичне масштабування для високої розділової здатності камер видимого діапазону сягає 17,3...26...33 (залежно від конкретної моделі в лінійці); кут зору змінюється в діапазоні

36,3...31,2-1,2...1,1°, а для детального аналізу сцени може використовуватися окрема камера HD-якості (т. зв. Daylight Spotter) зі зменшеним кутом зору (0,63...0,43..0,2°) та обмеженим діапазоном регулювання збільшення (2,5... 5,0х).

Існують й інші сучасні розробки відеокамер для БПЛА [13; 14], що дозволяє з'ясувати сучасний стан розвитку та можливості цієї техніки загалом.

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Як відомо, інформаційний потік з екрана відеомонітора F можна визначити, як відношення обсягу відображуваної інформації I до часу t, протягом якого ця інформація виводиться в незмінному вигляді:

$$F = I/t. \quad (1)$$

Пропускна спроможність людини-оператора F_{on} за своєю сутністю є також інформаційним потоком, який описує фізіологічні здібності людини до швидкої переробки інформації і залежить від індивідуальних особливостей, ступеня тренованості, рівня втоми тощо. Для нормальної роботи людино-машинної системи має виконуватися умова інформаційної узгодженості:

$$F \leq F_{on}. \quad (2)$$

Зазвичай на практиці вирішення проблеми неузгодження інформаційного потоку від засобу відображення інформації з можливостями людини здійснюється екстенсивним шляхом збільшення чисельності екіпажу БПЛА, коли, крім пілота, додаються інші члени, такі як оператори різних сенсорів, виконавчих механізмів та ін. Це дозволяє розбити весь обсяг отримуваної інформації на частини I_k так, що кожен з N операторів у змозі цю інформацію переробити:

$$F = \sum_{k=1}^{N} \frac{I_k}{t}. \quad (3)$$

Очевидно, що такий шлях є тупиковим. У цій роботі робиться спроба застосувати мультидисциплінарний підхід до вирішення проблеми, визначивши можливості, які надає сучасний рівень розвитку техніки створення зображень, технологій та алгоритмів керування електромеханічними системами, а також методів обробки зображень.

Мета статті. Метою статті є формулювання концепції вирішення проблеми підвищення швидкості прийняття рішення людиною-оператором БПЛА на основі інформації, отримуваної із зображень, які передаються в реальному часі відеокамерами, встановленими на рухомій відносно БПЛА платформі, за рахунок інтелектуальної системи керування цією платформою.

Сфера використання отриманих наукових результатів – від спеціальної техніки та розвідки до таких суто громадянських сфер, як сільське господарство (наприклад, з'ясування ступені зрілості посівів), геологія (пошук корисних копалин), контроль автомобільного трафіку, своєчасне попередження та запобігання катастрофічних наслідків кліматичних впливів та ін.

Концептуальні засади. Для досягнення поставленої мети підвищення швидкодії системи виявлення оператором потрібних об'єктів на зображенні поверхні під БПЛА, який рухається, спочатку визначимо цю швидкодію, як величину, обернену до часу t_{av}, що в середньому проходить від моменту появи на екрані об'єкта до моменту реакції оператора на цю подію:

$$p=1/ t_{av}.$$

З метою підвищення надійності розпізнавання об'єкта система повинна автоматично виділяти (підсвічувати, маркувати тощо) на екрані області, які можуть містити об'єкти, а також, у визначених випадках, скеровувати гіростабілізовану платформу, на якій розміщено камеру, на певні області та/або, крім того, формувати команду на електронно-оптичне масштабування зображення. Процес переміщення платформи з відеокамерами

має носити оптимальний за швидкодією характер, без перерегулювання. Це вимагає побудови моделі БПЛА – гіростабілізована платформа, а також ідентифікації параметрів цієї моделі. Унаслідок неідеальності моделі та визначення її параметрів процес керування, який буде реалізованим, стане квазіоптимальним [14], проте, у випадку реалізації ітераційного підходу, може бути забезпечена потрібна якість регулювання (а саме – точність та час встановлення). Тобто апаратний (автоматичний) рівень системи є таким, що допомагає людині-оператору (верхній рівень) прийняти адекватне кінцеве рішення.

Дослідження охоплює такі сфери, як розпізнавання образів; теорія людино-машинної взаємодії; теорія автоматичного управління; електротехнічні та електронні комплекси та системи; теорія складних систем.

Для вирішення завдання розпізнавання образів і ідентифікації моделі об'єкта керування доцільно використання елементів штучного інтелекту, в тому числі штучних нейронних мереж глибокого навчання на етапах попередньої обробки (наприклад, корекції геометричних спотворень зображення, придушення шумів і перешкод тощо), а також визначення регіону інтересу.

Розрахунок геометричних параметрів системи. На рис. 1 наведені основні позначення величин, які використовуються в подальших розрахунках. БПЛА летить на висоті H над поверхнею, причому відеокамера нахилена на кут α відносно нормалі до поверхні, що зазвичай дозволяє пілоту бачити обставини попереду руху апарата. У випадку варіофокального об'єктива кут зору камери β може змінюватися. Конус зору камери на поверхні спирається на коло радіусу R (на цьому етапі спрощуємо ситуацію, припускаючи $\alpha = 0$). У формуванні зображення бере участь тільки частина площі цього кола – прямокутна ділянка висотою h та шириною b, яка вписана в коло. Крім зміни масштабу зображення за рахунок регулювання фокусної відстані об'єктива можлива зміна також напряму зору камери за кутами тангажу та рискання за рахунок окремого від БПЛА руху гіростабілізованої платформи.

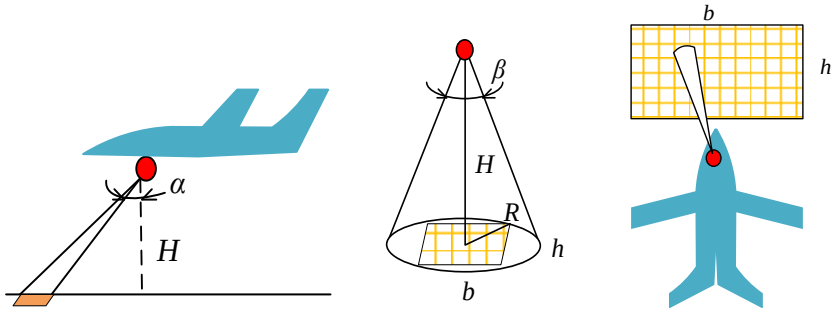


Рис. 1. Геометричні параметри системи

Базуючись на визначеннях, представлених на рис. 1, можемо знайти розмір досліджуваної поверхні залежно від кута зору камери β та висоти польоту БПЛА H.

$$R = H \operatorname{tg}\frac{\beta}{2}; \qquad R^2 = \frac{b^2+h^2}{4}; \qquad b = K_f h;$$

$$h = \frac{2R}{\sqrt{K_f^2+1}} = \frac{2H \operatorname{tg}\frac{\beta}{2}}{\sqrt{K_f^2+1}}; \quad b = 2H \operatorname{tg}\frac{\beta}{2}\frac{K_f}{\sqrt{K_f^2+1}}; \quad \beta = 2 \operatorname{arctg}\left(\frac{h}{2H}\sqrt{K_f^2+1}\right).$$

Тут $K_f = b{:}h$ – формат зображення.

На рис. 2 показана залежність вертикального розміру зображення h (вздовж напряму польоту) безпосередньо на досліджуваній поверхні від кута зору камери, якщо БПЛА знаходиться на певних висотах.

З іншого боку, відстань s, яку апарат, що летить зі швидкістю v, за час T_r, становить

$$s = v\,T_r.$$

За умови $s = h$,

$$T_r = h / v.$$

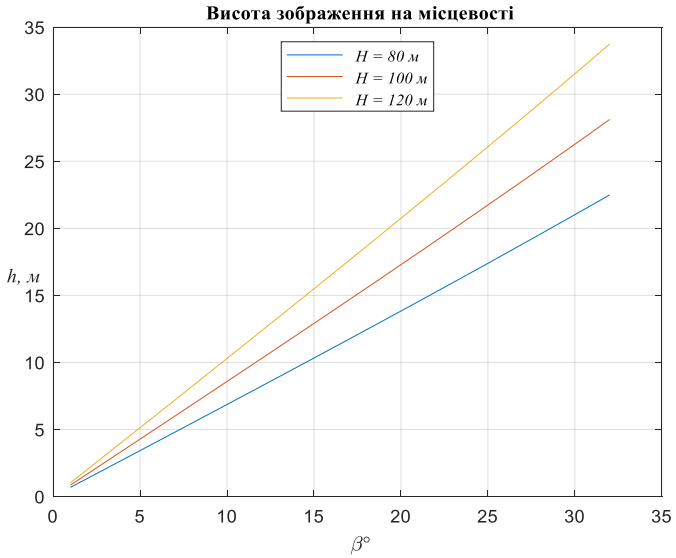


Рис. 2. Залежність вертикального розміру зображення на поверхні від кута зору камери

Припустимо, кут зору камери становить $\beta = 23°$. При цьому, якщо БПЛА знаходиться на висоті $H = 100$ *м,* висота зображення на поверхні складає $h = 20$ *м* (рис. 2). За умови швидкості $v = 72$ *км/год*. БПЛА проходить відстань $s = 20$ *м*, тобто кадр зображення оновлюється на 100 % за $T_r = 1$ *с*.

Найбільш популярним на сьогодні форматом зображення, що формується відеокамерами, встановленими на БПЛА, є HD n_x x n_y = 1920×1080 (K_f = 16:9). Звідси витікає розмір одного пікселя для H =100 *м,* $\beta = 23°$*:*

$$\Delta = h/n_y = 2000/1080 \approx 1{,}85 \text{ см.}$$

Тут n_x, n_y – кількість пікселів вздовж горизонталі та вертикалі відповідно.

Часові параметри тільки-но масштабування та фокусування розглянутих вище найкращих на сьогодні зразків відеокамер високої розділової здатності, які застосовуються в БПЛА [1; 2; 6-14], становлять одиниці секунд. Тобто якщо (як у наведеному вище розрахунку) за 1 *с* повністю змінюється вміст кадру зображення, то інформаційний потік з екрану відеомонітора становить $F = 1920×1080/1$ с $\approx 2{,}07 \cdot 10^3$ *біт/с* у випадку всього лише бінаризованого (двохградаційного) зображення. Це суттєво перевищує можливості навіть добре тренованої людини. Проте слід зауважити, що більша частина зображення переважно не містить значущої інформації. До того ж існує суттєва кореляція між сусідніми пікселями, що лежить в основі певних алгоритмів стискання зображень. Це відкриває шляхи до застосування інтелектуальної фільтрації зображення з метою зменшення навантаження на оператора.

Зонування зображення. Розіб'ємо весь кадр зображення на прямокутні ділянки зі співвідношенням сторін, яке відповідає формату кадру (рис. 3). Для кращої адаптації до цифрових методів аналізу використаємо цілі ступені числа 2 в якості одного й того ж коефіцієнта ділення K_d одночасно вздовж вертикалі та горизонталі. Зважаючи на діапазони масштабування та кути зору реальних відеокамер для БПЛА [1; 2; 6-14], доцільно використати

$$K_d = 2^4 ... \ 2^5 = 16...32.$$

У звичайному навігаційному режимі оператор-пілот БПЛА використовує відеозображення зі стандартною частотою кадрів F_f. Система розпізнавання має в запасі відрізок часу T_r, за який БПЛА пройде шлях, що дорівнює висоті кадру на місцевості (h на рис. 2).

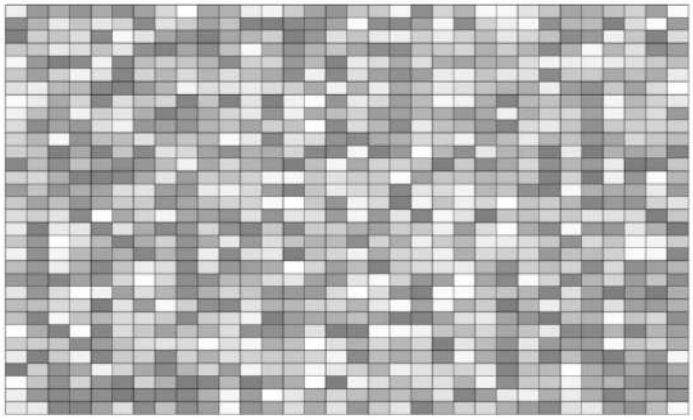


Рис. 3. Зонування зображення ($K_d = 2^5 = 32$)

Протягом цього часу автоматизована система нижнього рівня має визначити зону інтересу на вихопленому кадрі (від 1 до K_d вздовж обидвох горизонтальних координат на поверхні під БПЛА) та сформувати команди на:

1) зміну кута зору камери $\beta_1 \leftrightarrow \beta_2$ для потрібного масштабування M зображення;

2) позиціювання камери до визначеної зони інтересу (N_x, N_y) вздовж координатних осей (N_x та N_y лежать у діапазоні від 1 до K_d).

У випадку використання варіофокального об'єктива кут зору камери β буде являти собою дискретний набір безперервних значень. Якщо наявна окрема спот-камера, кут зору визначатиметься технічними параметрами саме цієї камери (безперервний або дискретний набір у меншому діапазоні). В обох випадках доцільно (проте не обов'язково) використати фіксоване значення M, яке визначається наперед і забезпечує оптимальне збільшення зображення відповідно до поставлених завдань. Звичайно, команди позиціювання видаються на ту камеру, яка використовується для збільшення фрагмента вхідного зображення.

Електромеханіка відеокамер для БПЛА. У межах сформульованої вище концепції вирішення проблеми підвищення швидкодії людино-машинної системи розглянемо можливі способи встановлення відеокамери на БПЛА. У загальному випадку потрібно виконувати такі взаємопов'язані дії (рис. 4):

1) дискретне (K_d кроків) позиціювання за кутом рискання (орієнтація вздовж горизонтальної сторони зображення) на кути ±16…32° (залежно від кута зору основної відеокамери β_2);

2) дискретне (K_d кроків) позиціювання за кутом тангажу (орієнтація вздовж вертикальної сторони зображення) на кути ±(16…32°)/K_f (залежно від β_2);

3) однократна або дискретна (залежно від вирішуваної задачі, складності та вартості розроблюваної системи) зміна фокусної відстані об'єктива відеокамери (тобто масштабування зображення, – збільшення з коефіцієнтом M; $\beta = \beta_1$);

4) однократне або дискретне (залежно від вирішуваної задачі, складності та вартості розроблюваної системи) фокусування відеокамери.

З метою спрощення рисунку балансири не показані. Усі зазначені дії можна виконати за допомогою використання базової гіростабілізованої платформи, на якій встановлено блок усіх сенсорів, а для створення саме механічного руху застосовувати перетворювачі електричної енергії в механічну, тобто електродвигуни:

M_b – орієнтація за кутом рискання;

M_h – орієнтація за кутом тангажу;

M_M – масштабування;

M_f – фокусування.

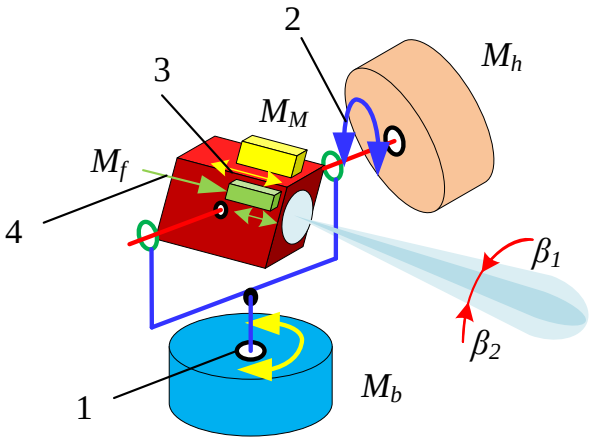


Рис. 4. Схема електроприводів

У системах масштабування зображення та фокусування об'єктивів відеокамер нині використовують цілий спектр різноманітних електромеханічних перетворювачів. Найбільш популярними є крокові та ультразвукові двигуни [16]. Принагідно слід зазначити, що будь-який об'єктив зі змінюваною фокусною відстанню потенційно складніший, дорожчий і має гірші властивості (точність, світлосила, сталість характеристик), ніж пристрій із постійними параметрами. А головне – потрібен час для налаштування об'єктива, що є неприйнятним у контексті вирішуваної задачі.

Тому використаємо окрему спот-відеокамеру з фіксованим кутом зору та сталим фокусуванням, яка забезпечує формування окремого відеоканалу, що реалізується паралельно з основним навігаційним (рис. 5).

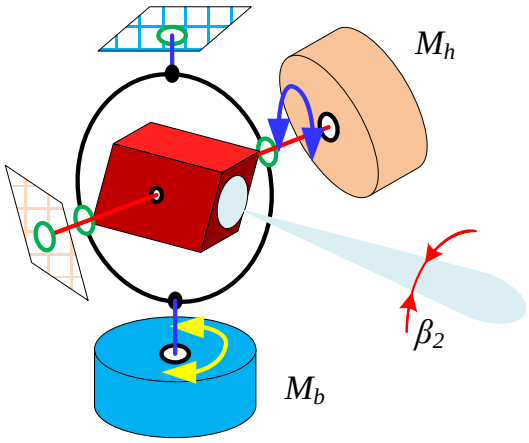


Рис. 5. Електромеханічна схема позиціювання спот-камери

Використання окремого карданового підвісу для спот-камери, безперечно, ускладнює конструкцію. Проте, згідно з головною поставленою метою, можна зазначити, що цей варіант дозволяє вирішити задачу підвищення швидкодії системи загалом, а тому є виправданим. Стосовно техніко-економічних характеристик, потрібне додаткове дослідження, оскільки використання двох відеокамер з фіксованими кутами зору може бути більш доцільним. Наприклад, для налаштування, тестування та документування місії, коли після її завершення є можливість доступу до зображення з основної навігаційної відеокамери, а не тільки до міксованого зображення.

Отже, в межах цієї статті обмежимося розглядом приводів тільки-но для позиціювання спот-відеокамери щодо гіростабілізованої платформи, причому збільшене зображення може відображуватися як на основному моніторі, так і на додатковому з паралельною сигналізацією оператору про необхідність звернути увагу саме на це збільшене

зображення. З цією метою намагатимемося використовувати прямий привід, що дозволяє зменшити масу, габарити та підвищити точність позиціювання. Як приклад для подальшого аналізу візьмемо безколекторні двигуни постійного струму (БДПС) M_b та M_h [17].

Безпосередній розробці приводу має передувати моделювання, яке дозволяє швидко та з мінімальними витратами виявити наявні проблеми, оцінити фактори, що на них впливають, та сформулювати задачі для подальшого вирішення. Скористаємося можливостями середовища комп'ютерного моделювання MATLAB® та Simulink®.

На рис. 6 показана структура Simulink®-моделі приводу позиціювання спот-камери за кутом рискання. За основу взятий приклад BLDC Position Control [18]. Ідеальне джерело крутного моменту задає навантаження (load). Блок керування реалізує пропорційно-інтегральні алгоритми керування на основі трьох контурів: зовнішнього контуру положення, контуру керування швидкістю та внутрішнього контуру керування струмом обмоток. БДПС живиться від керованого трифазного інвертора. Блок завдання формує ступінчасті сигнали на позиціювання, а блок осцилографів здійснює візуалізацію перехідних процесів у системі.

Приклад був доопрацьований відповідно до проблематики даного дослідження. Так, замість IGBT у блоці *Інвертор* використані MOSFET-транзистори, які мають кращі динамічні характеристики і, за рахунок використання вищої частоти комутації у блоці широтно-імпульсної модуляції, дозволять покращити масогабаритні показники системи. Предметом подальших розвідок стане реалізація оптимальних законів регулювання.

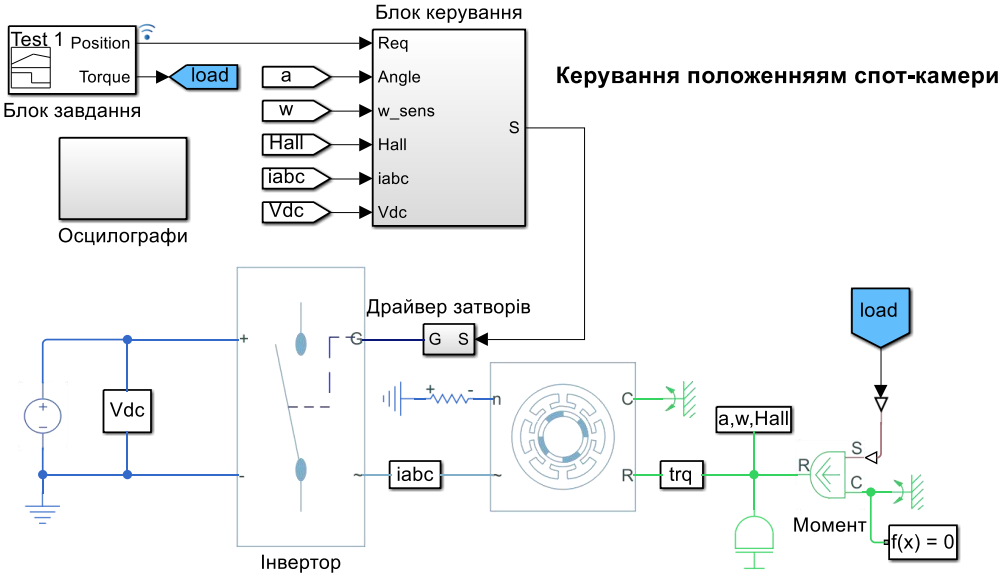


Рис. 6. Модель привода позиціювання спот-камери за кутом рискання

Результати симуляції (рис. 7) підтверджують можливість використання даної моделі для вирішення поставлених задач, проте потрібно подальше доопрацювання та уточнення її параметрів з урахуванням конкретики розроблюваної системи (маси, сили, моменти, робочі напруги, коефіцієнти регулювання та ін.).

Висновки. Для вирішення проблеми підвищення швидкодії оператора БПЛА запропоновано концепцію, яка передбачає ієрархічну побудову людино-машинної системи. На нижньому програмному рівні виконується алгоритм аналізу зображення з основної відеокамери високої розділової здатності з широким кутом зору та визначається одна з дискретних зон, де вірогідність присутності об'єкта інтересу перевищує порогове значення. Сформований номер зони зображення використовується для формування керуючих впливів, які передаються на систему апаратного рівня, яка, зокрема, містить два електроприводи, відповідальні за позиціювання розміщеної на карданновому підвісі додаткової відеокамери з масштабуванням зображення в межах однієї

зони. Скорочення часу позиціювання спот-камери відбувається за рахунок квазіоптимального за швидкодією закону регулювання з мінімальним перерегулюванням та часом встановлення. Зображення зі спот-камери використовується або безпосередньо для оперативного прийняття рішення, або тільки-но для документування місії та скорочення часу підготовки звіту.

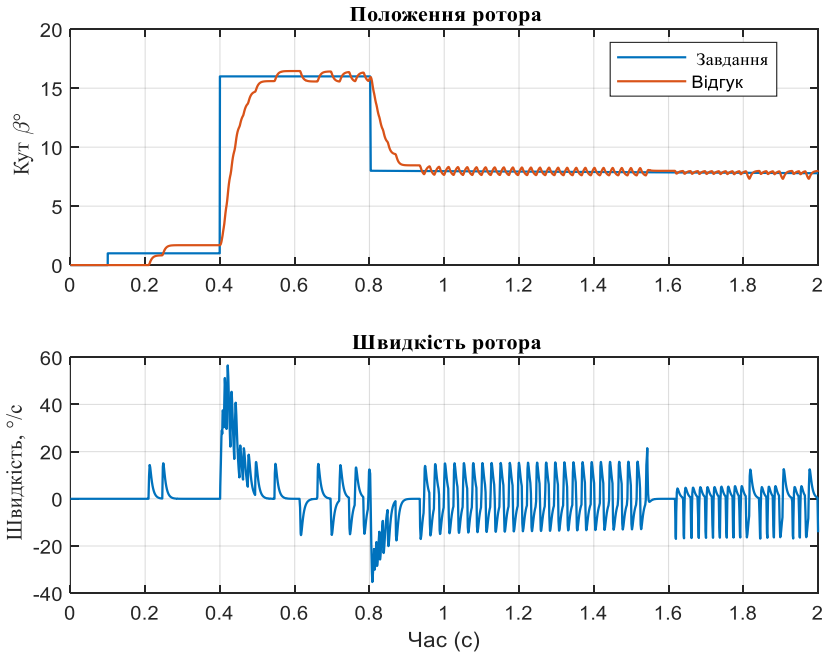


Рис. 7. Моделювання позиціювання спот-камери за кутом рискання

Враховуючи мультидисциплінарність дослідження, подальші зусилля мають бути сконцентровані на питаннях реалізації трьох взаємопов'язаних підсистем: визначенні релевантних алгоритмів розпізнавання, розробці апаратної підсистеми, моделюванні поведінки оператора та розробці програми експерименту.

Список використаних джерел

1. FCB-9500 Series – New Colour Camera Block [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.image-sensing-solutions.eu/FCB-New-generation.html.

2. WESCAM MX-10 EO/IR, 2022 [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.l3harris.com/all-capabilities/wescam-mx-10-air-surveillance-and-reconnaissance.

3. Гиростабилизированные платформы [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://astrohn.ru/thermal-imaging-systems/girostabilizirovannye-kompleksy/gyrostabilized-platform/.

4. Обґрунтування необхідності обробки відеоінформації на борту розвідувального БПЛА [Електронний ресурс] / В. Г. Башинський, В. В. Рагулін, М. О. Солодчук, А. В. Фомін, О. О. Ісаченко // Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2022. – № 11. – С. 105-115. – Режим доступу: https://doi.org/10.37701/dndivsovt.11.2022.12.

5. Reliable full motion video services in disadvantaged tactical radio networks / Nightingale J. et al. // 2016 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). – 2016. – Pp. 1-9. – DOI: 10.1109/ICMCIS.2016.7496560.

6. Мультиспектральные камеры SLANTRANGE 4-го поколения. Модели 4P и 4P+ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://slantrange.com.ua/sensors-4p.

7. Francisco Gomez. Camera Parameters [Electronic resource]. – Accessed mode: https://slantrange.zendesk.com/hc/en-us/articles/4409968622100-Camera-Parameters.

8. HENSOLDT VOS – Visual Optronic Sensor Digital EO reconnaissance camera [Electronic resource]. – Accessed mode: https://dam.hensoldt.net/m/482cf0f5ba3fafaf/original/VOS-Visual-Optronics-Sensor-English.pdf.

9. Goshawk-II HD / HDT. Light weight airborne ISR and ISTAR system [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.hensoldt.net/products/optronics/goshawk-ii-airborne-isr-/-istar.

10. ARGOS-II HD / HDT. Airborne ISR and ISTAR system [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.hensoldt.net/products/optronics/argos-ii/.

11. DI-SC220. Hitachi Digital Media Group [Electronic resource]. – Accessed mode: http://www.hitachidigitalmedia.com/en-gb/discontinued-products/security-solutions/video-surveillance/di-sc220.

12. L3 HARRIS WESCAM. WESCAM's MX™-Series – multi-sensor and multi-spectral imaging and targeting systems. *Military Systems & Technology* [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.militarysystems-tech.com/suppliers/multi-sensor-and-multi-spectral-imaging-and-targeting-systems/l3-wescam.

13. CATS – COMMON APERTURE TARGETING SYSTEM –Electro-Optical Reconnaissance, Surveillance and Targeting System [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.aselsan.com.tr/ en/capabilities/electro-optic-systems/air-platforms/cats-common-aperture-targeting-system-electrooptical-reconnaissance-surveillance-and-targeting-system.

14. RATS – Electro-Optical Surveillance & Reconnaissance System [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.aselsan.com.tr/RATS_ElectroOptical_SurveillanceReconnaissance_System_6733.pdf.

15. Войтенко В. П. Квазиоптимальные промышленные регуляторы с нейроидентификацией объекта управления : монография / В. П. Войтенко. – Чернигов : Чернигов. гос. техн. ун-т, 2013. – 261 с.

16. Canon lens focusing motor technology [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.canon-europe.com/pro/infobank/usm-stm-lens-technology.

17. Войтенко В. Моделі елементів системи електроприводів квадрокоптерів та автономних роботів / В. Войтенко, Р. Єршов // Технічні науки та технології. – 2019. – № 3. – С. 175–187.

18. BLDC Position Control [Electronic resource]. – Accessed mode: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/bldc-position-control.html.

References

1. FCB-9500 Series – New Colour Camera Block. (n.d.). https://www.image-sensing-solutions.eu/FCB-New-generation.html.

2. WESCAM MX-10 EO/IR (2022). https://www.l3harris.com/all-capabilities/wescam-mx-10-air-surveillance-and-reconnaissance, Retrieved August 10, 2022.

3. Girostabilizirovannye platformy [Gyro-stabilized platforms]. (n.d.). https://astrohn.ru/thermal-imaging-systems/girostabilizirovannye-kompleksy/gyrostabilized-platform.

4. Bashynskyi, V.G., Ragulin, V.V., Solodchuk, M.O., Fomin, A.V., & Isachenko, O.O. (2022). Obgruntuvannia neobkhidnosti obrobky videoinformatsii na bortu rozviduvalnoho BPLA [Justification of the need to process video information on board the reconnaissance UAV]. *Naukovi pratsi Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky – Scientific works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, (11), 105-115. https://doi.org/10.37701/dndivsovt.11.2022.12.

5. Nightingale, J. et al. (2016). Reliable full motion video services in disadvantaged tactical radio networks. *2016 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)* (pp. 1-9). doi:10.1109/ICMCIS.2016.7496560.

6. *Multispektralnye kamery SLANTRANGE 4-ho pokoleniia. Modely 4R y 4R+ [SLANTRANGE multi-spectral cameras of the 4th generation. Models 4P and 4P+].* (n.d.). http://slantrange.com.ua/sensors-4p.

7. Francisco Gomez. Camera Parameters. (n.d.). https://slantrange.zendesk.com/hc/en-us/articles/4409968622100-Camera-Parameters.

8. HENSOLDT VOS – Visual Optronic Sensor Digital EO reconnaissance camera. (n.d.). https://dam.hensoldt.net/m/482cf0f5ba3fafaf/original/VOS-Visual-Optronics-Sensor-English.pdf.

9. Goshawk-II HD / HDT. Light weight airborne ISR and ISTAR system. (n.d.). https://www.hensoldt.net/products/optronics/goshawk-ii-airborne-isr-/-istar/.

10. ARGOS-II HD / HDT. Airborne ISR and ISTAR system. (n.d.). https://www.hensoldt.net/products/optronics/argos-ii.

11. DI-SC220. Hitachi Digital Media Group. (n.d.). http://www.hitachidigitalmedia.com/en-gb/discontinued-products/security-solutions/video-surveillance/di-sc220.

12. L3 HARRIS WESCAM. WESCAM's MX™-Series – multi-sensor and multi-spectral imaging and targeting systems. *Military Systems & Technology.* (n.d.). https://www.militarysystems-tech.com/suppliers/multi-sensor-and-multi-spectral-imaging-and-targeting-systems/l3-wescam.

13. CATS – COMMON APERTURE TARGETING SYSTEM –Electro-Optical Reconnaissance, Surveillance and Targeting System. (n.d.). https://www.aselsan.com.tr/en/capabilities/electro-optic-systems/air-platforms/cats-common-aperture-targeting-system-electrooptical-reconnaissance-surveillance-and-targeting-system.

14. RATS – Electro-Optical Surveillance & Reconnaissance System. (n.d.). https://www.aselsan.com.tr/ RATS_ElectroOptical_SurveillanceReconnaissance_System_6733.pdf.

15. Voytenko, V.P. (2013). *Kvazioptimalnye promyshlennye reguliatory s neiroidentifikatsiei obekta upravleniia [Quasi-optimal Industrial Regulators with Neuro-identification of the Plant]*. Chernihiv State Technological University.

16. Canon lens focusing motor technology. (n.d.). https://www.canon-europe.com/pro/infobank/usm-stm-lens-technology.

17. Voytenko, V., & Yershov, R. (2019). Modeli elementiv systemy elektropryvodiv kvadrokopteriv ta avtonomnykh robotiv [Models of elements of the electric drive system of the quadrocopters and autonomous robots]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (3(17)), 175–187. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-175-187.

18. BLDC Position Control. (n.d.). https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/bldc-position-control.html.

Отримано 10.06.2022

UDC 681.5 : 004.51

Volodymyr Voytenko[1], Maksym Solodchuk[2]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: v.voytenko@stu.cn.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1490-0600
ResearcherID: F-8698-2014. **Scopus Author ID**: 36167678700

[2]Head of the Department
State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: rocket15733@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0002-1162-6784

INCREASING THE SPEED OF ANALYSIS OF IMAGES OBTAINED FROM UNMANNED AERIAL VEHICLE

Carrying out long-term search and rescue missions, intelligence, surveillance and reconnaissance, which are carried out with the help of unmanned aerial vehicles (UAVs) overload the operator and reduce the effectiveness of solving the assigned tasks, up to the point of making their implementation impossible. The paper proposes the concept of increasing the speed of the human-machine system based on information obtained from images transmitted in real time by video cameras installed on a platform moving relative to the UAV, by mean of the intelligent control system of this platform.

Thus, the image from the main video camera with a wide viewing angle is divided into rectangular sections (zones), which size is determined by the viewing angle (zoom) necessary for the operator to make the final decision. The software system of the lower level, evaluating the video frame, determines and marks the areas in which the object of interest may be present. Increasing the focal length and focusing (i.e., zooming the image), as well as positioning the main camera is carried out for the area where the probability of the presence of the candidate object is the greatest. In another variant, a separate spot camera with a reduced and fixed field of view is aimed at the yaw and pitch angles, which requires that this camera be directly suspended on a gyro-stabilized platform, where a block of other sensors is installed, including the main video camera.

An example of modeling the electric drive of a spot camera by the yaw angle is given and further steps are determined for the development of subsystems of three levels: software (recognition), hardware (scaling and positioning), human-machine (coordination of information flows). To improve the dynamic characteristics in comparison with the basic proportional-integral laws, it is proposed to use quasi-optimal algorithms for regulating electric drives.

Keywords: *unmanned aerial vehicle (UAV); video sensor; image analysis; man-machine system; electric drive; MATLAB; Simulink.*

Fig.: 7. References: 18.

Войтенко В., Солодчук М. Підвищення швидкості аналізу зображень, отриманих із безпілотного літального апарату. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 127-137.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-138-145
УДК 621.314

Олег Сінчук[1], Віктор Горшков[2]

[1]доктор технічних наук, професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті
Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)
E-mail: speet@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9078-7315
[2]викладач,
ВСП «Гірничо-електромеханічний фаховий коледж Криворізького національного університету» (Кривий Ріг, Україна)
E-mail: horshkov.victor@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5129-4083

УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Метою статті є теоретичне обґрунтування підходу до управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення з урахуванням стохастичності показників вхідних параметрів до системи управління.

Враховуючи стратегії розвитку систем управління та активне впровадження в різні сфери світової економіки джерел розосередженої генерації, у тому числі на базі відновлюваних джерел електричної енергії, розвиваються гібридні системи штучного зовнішнього освітлення, керовані інтелектуальними системами керування. У статті запропоновано підхід до управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення. Запропонована структура електротехнічного комплексу вуличного освітлення на базі світлодіодних освітлювальних пристроїв та сучасних джерел електричної енергії. Враховуючи факт багатокритеріальності вхідних параметрів до системи управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення та неможливості точного попереднього визначення параметрів цих критеріїв, було запропоновано використовувати закон керування із застосуванням елементів нечітких множин, що дозволить покращити якість регулювання з підтримкою команд Fuzzy Logic.

***Ключові слова**: вуличне освітлення; енергетичне обладнання; електротехнічний комплекс; система управління; розосереджена генерація.*

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Мережі вуличного освітлення є невід'ємною частиною структури комунального господарства міст, селищ та великих населених пунктів. Електротехнічні комплекси вуличного освітлення на сьогодні є енергоємними, тому потребують модернізації з метою подальшої їх ефективної роботи та раціонального використання електричної енергії. Нині можливо досягти таких результатів лише в разі впровадження сучасних технологій та підходів до побудови систем управління [1].

Сучасними елементи систем освітлення є світлодіодні освітлювальні пристрої, які дуже економічні й надійні. Сьогодні проходить планова модернізація вуличного освітлення населених пунктів країни. Тож є доцільним розглядати електротехнічні комплекси вуличного освітлення на базі світлодіодних освітлювальних пристроїв.

Вуличне освітлення є важливою складовою інфраструктури населених пунктів. Якість функціонування зовнішнього освітлення населених пунктів є, з одного боку, запорукою комфорту людей та естетичності навколишнього простору, а з іншого – впливає на зменшення кількості дорожньо-транспортних пригод та інших кримінальних інцидентів [2].

Постановка проблеми. Недоліками застарілих систем вуличного освітлення, що наразі експлуатуються в населених пунктах України, є труднощі калібрування датчиків, чутливість датчиків до забруднення, неможливість реалізації енергозберігаючих алгоритмів роботи, використання графіка включень і виключень освітлення.

Впровадження нових технологій мереж освітлення дозволяють полегшити їх управління та підвищити їхню надійність.

Серед областей-лідерів у споживанні електроенергії зовнішніми освітлювальними мережами слід відзначити Львівську, Дніпропетровську, Харківську, Одеську, Київську, Запорізьку області [3].

За даними державної статистики, Дніпропетровська область за кількістю світлоточок входить у п'ятірку областей із високими показниками та посідає провідне місце серед областей за критерієм протяжності мереж зовнішнього освітлення населених пунктів [3].

© Сінчук О. М., Горшков В. В., 2022

Як показав аналіз частки різних типів світлоточок за типами джерел світла у Дніпропетровській області станом на 2019 р., рівень використання енергоефективних штучних джерел світла в зовнішніх освітлювальних мережах Дніпропетровської області середній серед показників інших областей України та становить 40 %, але не достатній для достатнього рівня ефективного електроенергоспоживання [3].

Оскільки Дніпропетровська область за кількістю світлоточок входить у п'ятірку областей з високими показниками та посідає перше місце серед областей за критерієм протяжності мереж зовнішнього освітлення населених пунктів, між тим не має бажаного рівня електроенергоефективності, то на її прикладі можна розглядати нові методи та підходи до модернізації зовнішніх освітлювальних мереж України.

Між тим, за результатами аналізованих даних можна зробити висновок про те, що модернізація систем освітлення з врахуванням енергоощадних технологій є актуальною в Україні. Проведення заходів із модернізації та переоснащення мереж зовнішнього освітлення дає можливість економії коштів на купівлю електричної енергії, розвантажує електромережі та стимулює досягнення бажаного рівня енергоефективного споживання електричної енергії.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. На сьогодні є безліч технічних рішень щодо побудови систем вуличного освітлення та систем управління ними. У запропонованих проєктах міститься широкий спектр функцій, таких як: додаткове декоративне різнокольорове підсвічування, різноманітні вбудовані дорожні маркери та світильники-аплайти та інше. Запропоновані технічні рішення побудови та модернізації вуличного освітлення, безумовно, підвищують безпеку відповідних зон, але обсяги споживання електричної енергії при цьому значно зростають. Водночас ці методи та технічні рішення не мають технічної можливості для широкого впровадження по всій території України та діють лише у великих містах або закордоном [1-5].

Запропоновані інтелектуальні системи управління вуличним освітленням існує лише як частина комплексу роботи «розумного будинку». Хоча при її використанні в схемі управління безпосередньо вуличного освітлення є можливість зменшити споживання електроенергії залежно від інтенсивності руху пішоходів та транспорту.

Дослідження питань формування електроенергетичних систем із джерелами розосередженої генерації знайшли відображення в роботах багатьох учених. Зокрема автори М. Іванова, І. Олейникова, Ю. Мисюк, С. Литовченко, Л. Назаренко, Р. Вінце запропонували використання інтелектуальної системи в освітленні пішохідних переходів як важливої складової інфраструктури міста. Розглянуто технологію димірування та датчиків руху в освітленні. Використовуючи димери та спеціальні бездротові вуличні вузьконаправлені датчики руху, розроблено концепцію автоматичної інтелектуальної системи управління для освітлення вуличних переходів. Проаналізувавши ринок вуличних ліхтарів, був розроблений дизайн світильника для дорожнього освітлення [6-15].

Між тим, результати перерахованих досліджень вказують на необхідність розробки удосконалених простих методів управління системами вуличного освітлення. Зважаючи на невизначеність багатьох показників системи керування освітлювальними комплексами, є можливість їх побудови з використанням методології нечіткої логіки.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Між тим, з погляду освітлення дороги та регулювання світлового потоку від вуличних світильників шляхом зміни величини сили струму, з метою зменшення рівня використання електричної енергії, наразі не є ефективним. Цей підхід регулювання необхідний для освітлення доріг у нічний час, за сприятливих погодних умов та зменшення інтенсивності транспортного руху в нічний час [5-8].

Оскільки інтенсивність руху транспорту не є величиною сталою, а залежить як від категорії дороги, так і від пори року, і часу доби, від стану дорожнього покриття та його освітлення і погодних умов, тому є можливість регулювання зовнішнього освітлення дороги залежно від вищеперелічених факторів, враховуючи періодичну зовнішню світимість у різних інтервалах часу.

Тому актуальною проблемою, що потребує вирішення, є побудова системи вуличного освітлення та системи управління нею, що буде у своїй роботі ефективно враховувати всі перераховані фактори.

Мета статті. Метою цієї статті є обґрунтування підходу до управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення з урахуванням стохастичності показників вхідних параметрів до системи управління.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 зображена запропонована структурна схема освітлювальної системи, що складається із системи управління, акумуляторної батареї, джерела електричної енергії, блок датчиків та світлодіодних освітлювальних установок.

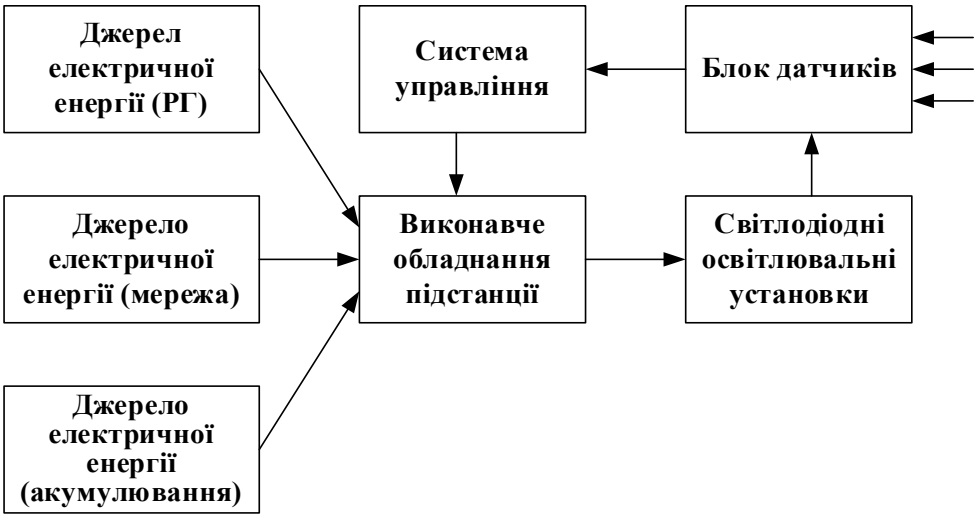


Рис. 1. Структурна схема освітлювальної системи

Класичне виконання світлодіодних вуличних ліхтарів являє собою повністю автономні освітлювальні прилади, що поєднали в собі найпередовіші досягнення в декількох галузях науки та техніки. Використовуючи високоякісний світлодіодний світильник, а також джерела розосередженої генерації, можна створити вуличні освітлювальні системи, які не залежать від зовнішнього електропостачання. Значними перевагами запропонованої освітлювальної системи є можливість встановлення на будь-якій місцевості, де неможливо провести кабель чи повітряну лінію електроживлення. Застосування надійної автоматики дозволяє використовувати найрізноманітніші режими роботи ліхтарів та досягнути терміну безперервної роботи, що значно довший у порівнянні зі стандартними джерелами освітлення [7].

Автономність роботи освітлювальних систем особливо актуальна для міських та заміських ділянок автодоріг, де приєднання до електромережі ускладнене.

Регулювання зовнішнього освітлення здійснюється шляхом регулювання світлового потоку світильників, а джерелами світлового потоку є лампи, якими вони укомплектовані. Проте не всі типи ламп придатні до регулювання плавної зміни світлового потоку [8].

У світлодіодних світильників джерелом світла є світлодіоди, які мають високу світловіддачу і великий термін служби, а також мають можливість глибокого регулювання світлового потоку від 10 до 100 %, та досить легкий спосіб його реалізації, шляхом зміни сили струму, який проходить через світлодіоди.

При нормованій яскравості понад 0,8 кд/м^2 або середній нормованій освітленості понад 15 лк в нічний час допускається зниження рівня вуличного освітлення:

– на 20 % при зменшенні інтенсивності транспортного руху до $^1/_2$ максимальної величини (k_{max});

– на 30 % при зменшенні інтенсивності транспортного руху до $^1/_3$ максимальної величини (k_{max});

– на 40 % при зменшенні інтенсивності транспортного руху до $^1/_4$ максимальної величини (k_{max});

– на 50 % при зменшенні інтенсивності транспортного руху до $^1/_5$ максимальної величини (k_{max}).

Тобто для категорії доріг класу А і Б та підкласу В1 можливе регулювання світлового потоку від вуличних світильників із лампами, у яких можливе регулювання світлового потоку величиною сили струму, що проходить через них.

Використання закону керування можна провести із застосуванням елементів нечітких множин, що дозволить покращити якість регулювання з підтримкою команд Fuzzy Logic.

На вхід нечіткого регулятора пропонується подавати такі сигнали – відносне значення освітленості дорожнього покриття, відносне значення напруги мережі, відносне значення відношення напруги мережі до напруги споживання, відносне значення активності руху. Вихідним сигналом каналу регуляторів системи керування є регулювання струму живлення світлодіодних освітлювальних пристроїв.

Наступним кроком створення нечіткої математичної моделі є фазифікації вхідних величин X згідно з термами, і отримання нечіткої множини X .

Для функціонування математичної моделі нечіткого логічного висновку необхідно сформувати експертну базу знань нечітких правил, що містить лінгвістичні правила залежності $y = f(x)$.

Визначимо діапазон зміни вхідних і вихідних величин та проведемо їх лінгвістичну оцінку, згідно з термами, що занесені до табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристика вхідних та вихідних величин математичної моделі нечіткого висновку про струму завдання

Параметри	Назва	Діапазон значень	Терми
X_1	Відносне значення освітленості дорожнього покриття	0…2Ф	Дуже мала (DM), Мала(M), Середня (C), Висока(B), Дуже Висока (DB)
X_2	Відносне значення напруги мережі	0,5…1,5U	Дуже мала (DM), Мала (M), номінальна (C), Висока(B), Дуже Висока (DB)
X_3	Відносне значення відношення напруги мережі до напруги споживання	0…2U	Середня (Zero), Висока додатня (Posit), Висока від'ємна (Negat)
X_4	Відносне значення активності руху	0…2N	Мала (Menshe), Нормальна (Normal), Вище норми (Bilshe)
Y	Значення струму завдання у частках номінального струму завдання	0…2I_Z	Мінімальне (M), Дуже Мале (DM),Середнє (C), Високе (B), Дуже Високе (DB)

Джерело: розроблено авторами.

Наступним кроком створення нечіткої математичної моделі є фазифікація вхідних величин X згідно з термами, і одержання нечіткої множини $\tilde{\mathrm{X}}$.

Для функціонування математичної моделі нечіткого логічного висновку необхідно сформувати експертну базу знань нечітких правил, яка містить лінгвістичні правила залежності Y = f(X). Базу знань можна представити у вигляді :

$$(x_1 = a_{1j}\theta_j x_2 = a_{1j}\theta_j ... \theta_j x_n = a_{nj}) \Rightarrow Y = d_j,\ j = \overline{1,m}, \qquad (1)$$

де $\tilde{a}_{ij}$ – нечіткий терм, яким оцінюється змінна x_i в j-тому правилі;

Θ_j – логічна операція, що пов'язує фрагменти j-ого правила;

m – кількість правил в базі.

База знань ключових нечітких правил представлена у вигляді таблиці 2.

Таблиця 2 – База знань нечітких правил

Входи				Вихід
X_1	X_2	X_3	X_4	Y
DM	DM	Posit	Menshe	
DM	DM	Posit	Menshe	
DM	M	Posit	Menshe	
M	M	Posit	Menshe	DM
DM	DM	Posit	Menshe	
DM	DM	Posit	Menshe	
DM	M	Posit	Normal	
DM	M	Posit	Normal	
DM	M	Posit	Normal	
DM	M	Posit	Normal	M
C	C	Zero	Normal	
C	C	Zero	Normal	
C	C	Zero	Normal	
C	C	Zero	Normal	
C	C	Zero	Normal	C
C	C	Zero	Bilshe	
C	C	Zero	Bilshe	
B	C	Negat	Bilshe	
B	B	Negat	Bilshe	B
B	B	Negat	Bilshe	
B	B	Negat	Bilshe	
B	B	Negat	Bilshe	
B	B	Negat	Bilshe	
DB	DB	Negat	Bilshe	DB
DB	DB	Negat	Bilshe	

Джерело: розроблено авторами.

Маючи виміряні вхідні величини X, використовуючи дану модель, знаходимо нечітку множину $\boldsymbol{Y}$, з якої після операції дефазифікації, за методом центра ваги, отримуємо значення коригувального коефіцієнта величини вихідного струму управління.

Результати моделювання запропонованої моделі, яка побудована з використанням компонент теорії нечітких множин, представлені на рисунках 2 і 3.

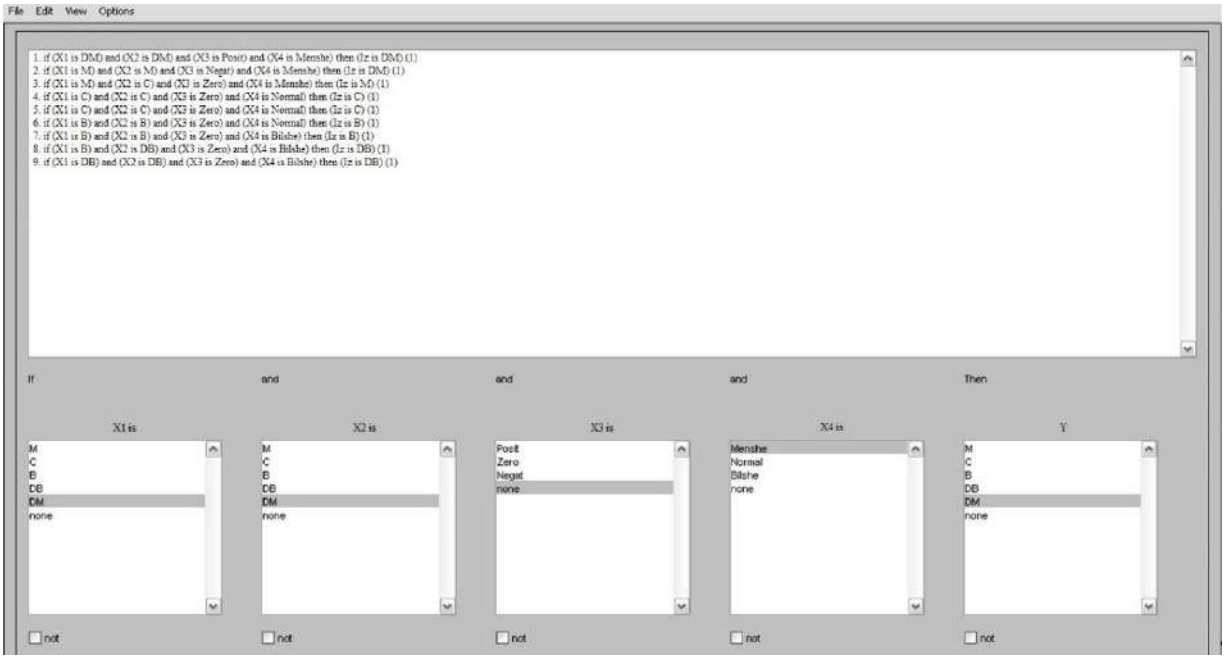


Рис. 2. База правил нечіткого логічного висновку

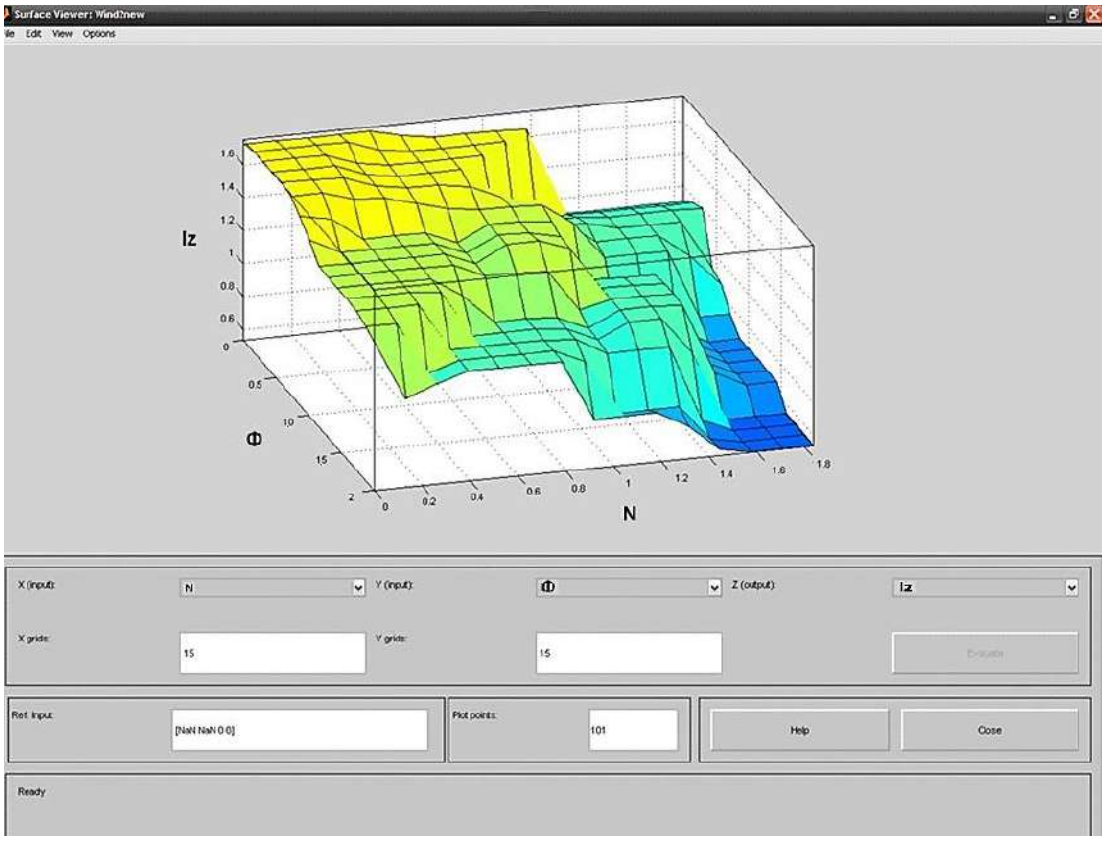


Рис. 3. Залежність струму завдання від відносних показників значення освітленості дорожнього покриття та активності руху

Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що параметри, які досліджуються, залежать один від одного плавно. Це означає, що зміна одного параметра навіть на незначну величину викликає зміни інших параметрів.

Висновки. У статті запропоновано підхід до управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення. Враховуючи факт багатокритеріальності вхідних параметрів до системи управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення та неможливості точного попереднього визначення параметрів цих критеріїв, було запропоновано використовувати закон керування із застосуванням елементів нечітких множин, що дозволить покращити якість регулювання з підтримкою команд Fuzzy Logic.

Напрямом подальших досліджень є збільшення функцій запропонованого комплексу, з метою зниження витрат на електроенергію та підвищення ефективності використання освітлювальних систем у населених пунктах.

Список використаних джерел

1. Говоров П. П. Освітлювальні електричні системи та мережі / П. П. Говоров, В. О. Перепечений, В. П. Говоров. – Х. : ХНАГХ, 2009. – 227 с.

2. Находов В. Ф. Визначення впливу споживачів на нерівномірність електричного навантаження енергетичної системи / В. Ф. Находов, А. І. Замулко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 1998. – № 3. – С. 19-21.

3. Міністерство розвитку громад та територій України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.minregion.gov.ua.

4. Сосницька Н. Л. Дослідження штучного освітлення на основі зв’язку спеціальних та статистичних методів / Н. Л. Сосницька, О. А. Іщенко, О. Є. Сокот // Наукові записки Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка. Сер.: Педагогічні науки. – 2019. – № 177(2). – С. 104-108.

5. Говоров П. П. Автоматизація керування режимами міських електричних мереж : монографія / П. П. Говоров, В. Ф. Харченко, В. П. Говоров. – Х. : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 229 с.

6. Hajjaj M. The Effect of Using the Intelligent Lighting System to Deduct the Power Consumption at the Office / M. Hajjaj, M. Miki, K. Shimohara // IEEE 7th Conference on Systems, Process and Control (ICSPC). – 2019. – 66 p.

7. Бакан Г. М. Вступ до теорії експертних систем та баз знань / Г. М. Бакан. – К. : ВПЦ «Київський університет», 2005. – 90 с.

8. Sturm R. Managing for Impact: Lessons from the Implementation of the Seven-Country IFC Efficient Lighting Initiative / R. Sturm // Proceeding of «Right Light 6» Conference, Shanghai. – Mai 2005.

9. Chen Jansheng. China's Lighting Industry: Making Efficient & Affordable Lighting Products / Chen Jansheng // Proceeding of «Right Light 6» Conference. – Shanghai, 2005.

10. ДТП в Україні: скільки людей травмується і гине на дорогах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.slovoidilo.ua/2022/07/21/infografika/suspilstvo/dtp-ukrayini-skilky-lyudej-travmuyetsya-hyne-dorohax.

11. Офіційний сайт компанії ПОЛІГОНАЛЬ. Освітлення пішохідних переходів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://polygonal.com.ua/osvItlennya_pIshohIdnih_perehodIv.php.

12. Мисюк Ю. П. Зовнішнє освітлення міст та безпека дорожнього руху / Ю. П. Мисюк // Світлотехніка та електроенергетика. – 2013. – № 3-4. – С. 33-39.

13. Назаренко Л. А. Проблеми світлового забруднення / Л. А. Назаренко, В. С. Чернець // Світлотехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. – С. 6-17.

14. Литовченко С. Н. Принципи побудови і вибору елементної бази світлодіодних світильників та їх систем управління / С. Н. Литовченко, Л. А. Назаренко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2016. – № 1. – С. 30-33.

15. Интеллектуальная система управления уличным и внутренним освещением на основе диммирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.energosovet.ru/entech.php?idd=149.

References

1. Govorov, P.P., Perepechenii, V.O., & Govorov, V.P. (2009). *Osvitliuvalni elektrichni sistemy ta merezhi [Lighting electrical systems and networks]*. HNAMG.

2. Nakhodov, V.F., & Zamulko, A.I. (1998). Vyznachennia vplyvu spozhyvachiv na nerivnomirnist elektrychnoho navantazhennia enerhetychnoi systemy [Appreciation of the injection of supporters on the unevenness of the electrical demand of the energy system]. *Science in NTUU "KPI" – Naukovi visti NTUU «KPI»*, (3), 19-21.

3. Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy [Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine]. https://www.minregion.gov.ua.

4. Sosnitska, N.L., Ishchenko, O.A., & Sokot, O.E. (2019). Doslidzhennia shtuchnoho osvitlennia na osnovi zviazku spetsialnykh ta statystychnykh metodiv [Follow-up of piece lighting based on the linkage of special and statistical methods]. *Naukovi zapysky Tsentralnoukrainskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka. Ser.: Pedahohichni nauky – Scientific Notes of the Central Ukrainian State Pedagogical University named after Volodymyr Vinnychenko. Ser.: Pedagogical sciences,* (177(2)), 104-108.

5. Govorov, P.P., Kharchenko, V.F., & Govorov, V.P. (2017). *Avtomatyzatsiia keruvannia rezhymamy miskykh elektrychnykh merezh [Automation of the control of modes of urban electric networks]*. KhNUMG im. O. M. Beketova.

6. Hajjaj, M., Miki, M., & Shimohara, K. (2019). The Effect of Using the Intelligent Lighting System to Deduct the Power Consumption at the Office. *IEEE 7th Conference on Systems, Process and Control (ICSPC)*.

7. Bakan, G.M. (2005). *Vstup do teorii ekspertnykh system ta baz znan [Entry to the theory of expert systems and knowledge base]*. VPC "Kyiv University".

8. Sturm, R. (Mai 2005). Managing for Impact: Lessons from the Implementation of the Seven-Country IFC Efficient Lighting Initiative. *Proceeding of "Right Light 6" Conference*.

9. Chen Jansheng. (2005). China's Lighting Industry: Making Efficient & Affordable Lighting Products. *Proceeding of "Right Light 6" Conference*.

10. DTP v Ukraini: skilky liudei travmuietsia i hyne na dorohakh [Traffic accidents in Ukraine: how many people are injured and killed on the roads]. https://www.slovoidilo.ua/2022/07/21/infografika/suspilstvo/dtp-ukrayini-skilky-lyudej-travmuyetsya-hyne-dorohax.

11. Ofitsiinyi sait kompanii POLIHONAL. Osvitlennia pishokhidnykh perekhodiv [Official site of the company POLYGONAL. Illumination of light transitions]. https://polygonal.com.ua/osvItlennya_pIshohIdnih_perehodIv.php.

12. Misyuk, Yu.P. (2013). Zovnishnie osvitlennia mist ta bezpeka dorozhnoho rukhu [Outdoor lighting of cities and road safety]. *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka – Light engineering and power engineering*, (3-4), 33-39.

13. Nazarenko, L.A., & Chernets, V.S. (2016). Problemy svitlovoho zabrudnennia [Problems of light pollution]. *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka – Light engineering and power engineering*, (2), 6-17.

14. Litovchenko, S.N., Nazarenko, L.A. (2016). Pryntsypy pobudovy i vyboru elementnoi bazy svitlodiodnykh svitylnykiv ta yikh system upravlinnia [Principles for the selection of the elemental base of light-emitting lamps and control systems]. *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka – Light engineering and power engineering*, (1), 30-33.

15. Intellektualnaia sistema upravleniia ulichnym i vnutrennim osveshcheniem na osnove dimmirovaniia [Intelligent control system for street and indoor lighting based on dimming]. http://www.energosovet.ru/entech.php?idd=149.

Отримано 30.04.2022

UDC 621.314

Oleg Sinchuk[1], Victor Horshkov[2]

[1]Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automated Electromechanical Systems in Industry and Transportation
Kryvyi Rih National University (Kryvyi Rih, Ukraine)
E-mail: speet@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9078-7315

[2]lecturer
VSP "Mining and Electromechanical Vocational College of Kryvyi Rih National University" (Kryvyi Rih, Ukraine)
E-mail: horshkov.victor@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5129-4083

THE APPROACH TO STREET ELECTRIC LIGHTING COMPLEX MANAGEMENT WITH THE HELP OF A FUZZY REGULATOR

Street lighting networks are an integral part of the structure of communal economy of cities, towns and large settlements. Electrotechnical complexes of street lighting today are energy-intensive, therefore they need to be modernized in order to further their efficient operation and rational use of electrical energy. Today, it is possible to achieve such results only with the introduction of modern technologies and approaches to the construction of management systems.

Modern elements of lighting systems are LED lighting devices, which are very economical and reliable. To date, the planned modernization of street lighting in the country's population centers is underway.

Street lighting is an important component of the infrastructure of settlements. The quality of the functioning of the external lighting of populated areas is, on the one hand, a guarantee of people's comfort and the aesthetics of the surrounding space, and on the other hand, it affects the reduction of the number of traffic accidents and other criminal incidents.

The purpose of this article is the theoretical justification of the approach to the management of the electrotechnical complex of street lighting, taking into account the multi-criterion of the input parameters to the control system.

Taking into account the strategies for the development of control systems and the active implementation of distributed generation sources in various spheres of the world economy, including on the basis of renewable sources of electric energy, hybrid systems of artificial outdoor lighting controlled by intelligent control systems are being developed. The article proposes an approach to the management of the electrotechnical complex of street lighting. The proposed structure of the electrical complex of street lighting based on LED lighting devices and modern sources of electrical energy. Considering the multi-criterion of the input parameters to the control system of the electrotechnical complex of street lighting and the impossibility of precise preliminary determination of the parameters of these criteria, it was proposed to use the control law using the elements of fuzzy sets, which will improve the quality of regulation with the support of Fuzzy Logic commands.

Keywords*: street lighting; energy equipment; electrical engineering complex; control system; distributed generation.*

Fig.: 3. References: 15.

Сінчук О., Горшков В. Управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення за допомогою нечіткого регулятора. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 138-145.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-146-161
УДК 621.577.42

Микола Кізєєв[1], Михайло Куницький[2]

[1]кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри теплогазопостачання, вентиляції та санітарної техніки
Національний університет водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)
E-mail: m.d.kizieiev@nuwm.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1491-1695
Scopus Author ID: 57218687201

[2]аспірант
Національний університет водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)
E-mail: kunytskyi_az16@nuwm.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1700-8167

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ СТІЧНИХ ВОД У КАНАЛІЗАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМИ «TEMPEST» З МЕТОЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Розглянуто стічні води систем водовідведення як джерело теплової енергії для потреб гарячого водопостачання. Кількість теплової енергії в стічних водах залежить насамперед від їх витрати і температури. Застосовано програму «TEMPEST» для аналізу й моделювання процесів тепломасопередачі в стічних водах каналізаційних мереж. Проаналізовані математичні моделі температурного режиму стічних вод. На основі програми «TEMPEST» проведено моделювання температурного режиму стічних вод та розрахунки потенційної кількості теплової енергії, яку можна вилучити з стічних вод на різних ділянках внутрішньодворової мережі каналізації за допомогою теплових насосних установок.

Ключові слова: *температурний режим стічних вод; теплова насосна установка; математична модель; рекуперація тепла, TEMPEST.*

Рис.: 9. Табл.: 3. Бібл.: 27.

Актуальність теми дослідження. В Україні переважна кількість гарячої води для потреб міського населення готується і транспортується в централізованих системах теплопостачання та гарячого водопостачання (ГВП). Схема приготування гарячої води в таких системах передбачає передачу тепла від джерела (котельні або ТЕЦ) теплоносієм (перегрітою водою або парою) теплофікаційними мережами. Нагріта до температури 90-130 °С вода, наприклад, з котельні надходить у центральний тепловий пункт (ЦТП) мікрорайону або в індивідуальний тепловий пункт (ІТП) житлового будинку, де в теплообмінниках нагрівається холодна вода, що подається із системи водопостачання міста і має температуру 5-15 °С, до температури 55-60 °С.

У неопалюваний період робота котелень неефективна, бо виробляти тепло лише для ГВП теплогенеруючим організаціям невигідно. Тому в населених пунктах України, навіть у великих містах, практикується зупинка котелень і відключення централізованого ГВП на теплий період року. Це, а також недостатня якість гарячої води із систем централізованого ГВП (низька температура, її перепади та погана робота або відсутність циркуляційного трубопроводу) зумовлює необхідність дублювання централізованого ГВП мешканцями за допомогою децентралізованих систем, зазвичай шляхом встановлення квартирних електропідігрівачів води.

Основними недоліками традиційного централізованого теплопостачання та ГВП є:

- висока вартість природного газу, на якому працює більшість котелень у містах;
- низький коефіцієнт корисної дії переважно старих котлів, які ще експлуатуються;
- втрати тепла і гарячої води в погано ізольованих та зношених теплових мережах;
- великі витрати електроенергії на перекачування теплоносія по теплових мережах.

Можливими шляхами покращення роботи та збільшення енергоефективності систем централізованого теплопостачання є такі заходи:

© Кізєєв М. Д., Куницький М. О., 2022

- заміна старих труб теплотрас на нові попередньоізольовані (сталеві і поліетиленові для теплопостачання з низькопотенційним температурним режимом);
- перехід на низькопотенційні температурні режими теплопостачання об'єктів, на яких проведені заходи термомодернізації та влаштовані відповідні системи опалення;
- заміна старих котлів на сучасні з високим ККД;
- заміна старих мережевих насосів на нові більш енергоефективні (з високим ККД);
- використання когенераційних установок;
- використання пільгових тарифів на електроенергію;
- перехід на відновлювані джерела енергії [1].

Перехід на відновлювані джерела енергії передбачає використання таких джерел, як:
- відходи деревооброблення (тріска, тирса, пеллети);
- сонячні колектори на дахах будівель для ГВП;
- фотовольтаїчні установки;
- вітрові енергетичні установки;
- міні- та мікроГЕС;
- низькопотенційне тепло ґрунту, водойм, стічних вод (СВ), атмосферного та викидного повітря тощо за допомогою теплових насосних установок (ТНУ).

Постановка проблеми. Особливо гостро недоліки традиційного централізованого теплопостачання та ГВП проявилися в умовах проведення на території України інтенсивних бойових дій та систематичних ворожих обстрілів інфраструктури населених пунктів (об'єктів систем постачання електричної і теплової енергії, води та газу). Виведення з ладу одного або декількох елементів систем призводить до припинення функціонування практично всієї системи. Причому все відбувається на тлі безпрецедентного зростання цін на газ та інші енергоресурси та їх дефіциту і наближення опалювального сезону, коли цілями ворожих атак можуть бути об'єкти теплоенергетики.

З метою підвищення надійності функціонування вказаних систем інженерної інфраструктури необхідно їх дублювання та резервування автономними джерелами, у тому числі на основі відновлюваних джерел енергії. Наприклад, це можуть бути для систем електропостачання різноманітні генератори та акумулятори, фотовольтаїчні та вітрові енергетичні установки; для систем водопостачання – свердловини та резервуари чистої води, для газу – біогазові установки та газгольдери. Для гарантування екологічного та санітарно-епідеміологічного добробуту цивільного населення разом із системою водопостачання необхідно забезпечити надійну роботу системи каналізації, що може бути джерелом низькопотенційної теплової енергії, яку можна використовувати за допомогою термотрансформаторів (ТНУ), що перетворюють її у високопотенційну.

ТНУ можуть бути резервними і вже стають основними джерелами для систем теплопостачання і ГВП у населених пунктах багатьох країн. Розвинені країни декілька років тому поставили амбіційну мету – довести використання теплової енергії від ТНУ у 2030 році до 75 % від її загальної генерації і поступово, за планом, наближалися до цього показника, а події 2022 року значно інтенсифікували цей процес. В Україні, на жаль, ТНУ, на відміну європейських та інших розвинених країн світу, ще не набули повсякденного широкого застосування через високі інвестиційні затрати, але з кожним роком стають більш досконалими, а з кожним підвищенням цін на газ та електроенергію стають економічно більш привабливими, а інколи й єдиними можливими джерелами теплової енергії. Недостатньо швидкі темпи впровадження ТНУ в практику проєктування, будівництва та реконструкції сучасних енергоефективних систем теплопостачання і ГВП обумовлені також відсутністю достатньої кількості проведених теоретичних та експериментальних досліджень, математичного моделювання і комп'ютерних програм для розрахунків і оптимізації застосування різноманітних видів ТНУ та джерел низькопотенційної енергії.

Одним із найбільш поширених низькопотенційних джерел теплової енергії в межах населених пунктів є побутові і виробничі СВ, які Директивою ЄС 2018/2001 [1] визнані відновлюваним джерелом теплової енергії. СВ мають температуру в колекторах від +10 до +30 ºС залежно від їх виду, місця перебування в колекторі та періоду року. Такі температури забезпечують набагато більший коефіцієнт трансформації теплової енергії ТНУ порівняно з повітряними і геотермальними ТНУ, у яких температура зовнішнього повітря протягом року може коливатися від +35 º С влітку до -25 º С взимку, а температура ґрунту на глибині 10 м та глибше стабільна, але не дуже висока – дещо більше за +10 ºС. Надходження СВ в систему водовідведення нерівномірно, але, наприклад, для ГВП житлових будівель це ідеальний варіант, так як найбільша кількість тепла в СВ з'являється в години найбільшого споживання гарячої води.

Для оцінки енергетичного потенціалу СВ, що рухаються по колекторах, з метою використання цього потенціалу для потреб опалення та ГВП однієї або декількох будівель, мікрорайону міста або всього міста, необхідно знати їх температурний режим, визначення якого базується на достовірній математичній моделі гідравлічних процесів та процесів теплообміну СВ в колекторі з навколишнім середовищем. Під температурним режимом СВ у цій статті розуміється сукупність низки показників: середньозваженої температури СВ у каналізаційному колекторі, її зміни по мірі руху СВ у ньому та під час змішування потоків СВ з інших колекторів із різними температурами й добових коливань температури СВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш повний і системний огляд та аналіз 116 публікацій, що присвячені проблемам використання СВ як джерела тепла для ТНУ, був зроблений порівняно нещодавно в роботі [2]. Авторами цього огляду представлено перелік статей про рекуперацію тепла СВ та їхній потенціал на різних рівнях каналізаційної системи. Наданий системний огляд переваг і проблем на кожному з цих рівнів, взявши до уваги технічні, економічні та екологічні аспекти. У цьому дослідженні [2] проаналізовано такі важливі характеристики рекуперації тепла СВ, як температура та динаміка потоку СВ у каналізаційній системі та її вплив на навколишнє середовище. Визначено наявні прогалини у сфері рекуперації тепла СВ, яка має значний потенціал для постачання екологічно чистої енергії як окремим будівлям, так і мікрорайонам.

Треба зазначити, що науковцями вже присвячено дуже багато публікацій конструкціям теплообмінних пристроїв для вилучення тепла з СВ для ТНУ та сумісному використанню таких ТНУ з іншими низькопотенційними джерелами теплової енергії. Серед них можна виділити наукові праці вітчизняних авторів, зокрема [3; 4; 15; 16], а також ще більше закордонних науковців [6-14], причому присвячених не лише рекуперації тепла СВ, а й питної води [16; 17]. З кожним роком з'являється дедалі більше статей про інтеграцію ТНУ в системи централізованого теплопостачання населених пунктів [4; 8; 11; 13].

Набагато менше приділено уваги у вказаних публікаціях теоретичним аспектам ефективності використання тепла СВ [5] та дослідженням математичного опису процесів, що відбуваються в колекторах, резервуарах і спорудах каналізації, серед яких можна виокремити роботи Дюрренматта та Ваннера [18-21] і Абдел-Ала та ін. [26; 27].

Дюрренматт та Ваннер розробили [18; 19], а потім вдосконалили [21] математичну модель температурного режиму СВ в каналізаційній мережі з позицій системного аналізу, з врахуванням багатьох параметрів та коефіцієнтів, що впливають на процеси теплообміну в колекторах (рис. 1). Для розрахунків температур СВ у трубах каналізаційних колекторів Дюрренматт та Ваннер на основі цієї математичної моделі розробили [20] комп'ютерну програму «TEMPEST» (TEMPerature ESTimation), яка пізніше була модифікована і на теперішній час має актуальну поточну версію 1.02.

«TEMPEST» – це програма, яка оцінює динаміку та поздовжні просторові профілі температури СВ у трубопроводах каналізації. Вона базується на балансах тепла та маси в каналізаційних системах [18; 19] і моделює їх у вигляді двох основних елементів сис-

теми: трубопроводів та вузлів. Вузли вводяться для відображення розривів у каналізаційних лініях унаслідок бічних припливів, змін у геометрії труби, властивостей матеріалу й навколишнього ґрунту (рис. 2) і моделюються за рівняннями нерозривності.

Дослідження Дюрренматта та Ваннера [18-21] – математична модель і результати розрахунків програми «TEMPEST», продемонструвало, що передача тепла між СВ та навколишнім ґрунтом через стінки труб є найважливішим процесом при визначенні температурного режиму каналізаційних мереж. Поява програми «TEMPEST», спростила моделювання температурних режимів СВ і полегшила розрахунки їхнього теплового потенціалу при різних комбінаціях параметрів мережі, сприяло великому інтересу з боку науковців до виконання досліджень з моделювання каналізаційних мереж із застосуванням програми «TEMPEST» і розробленню власних програм [26; 27].

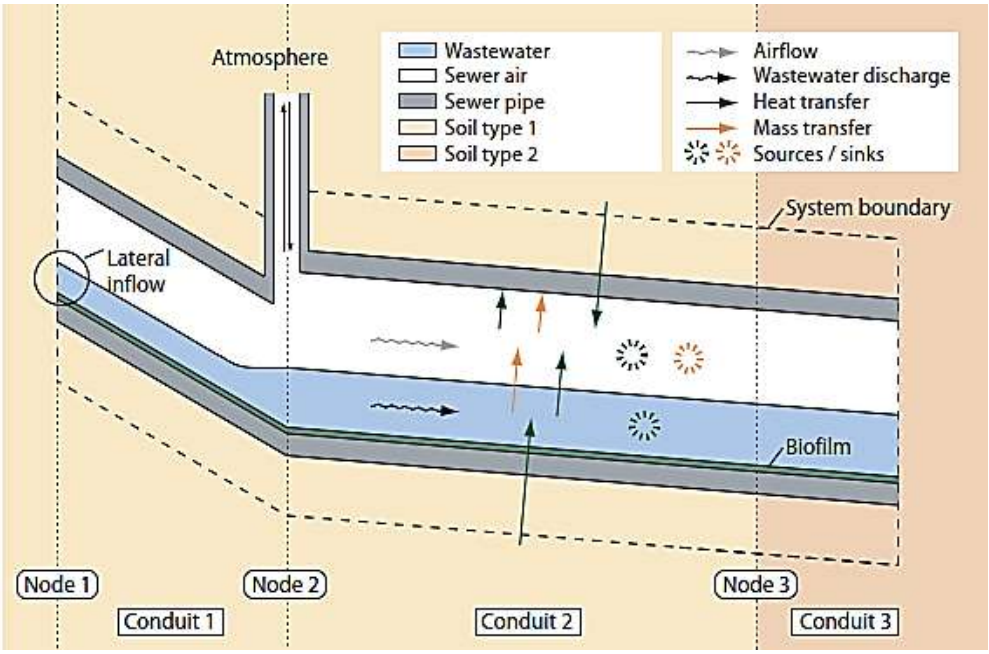


Рис. 1. Ділянки, вузли та процеси, що розглядаються в моделі каналізації, і реалізовані в програмі «TEMPEST» [20]

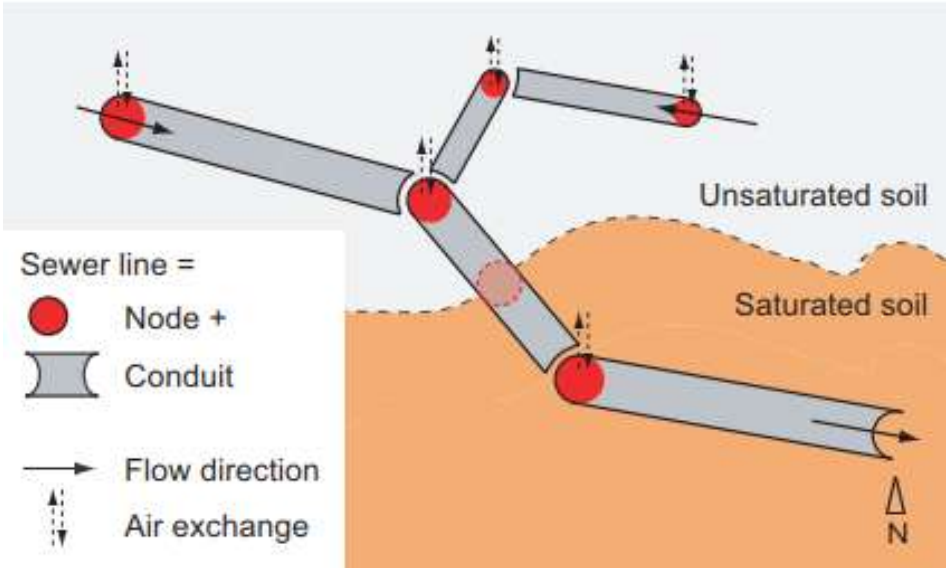


Рис. 2. Введення вузла, який розділяє труби з різними характеристиками [20]

Так, у дослідженні Алі та Гіліча [22] програма «TEMPEST» використовувалася для оцінювання потенціалу рекуперації тепла на каналізаційній ділянці в Лондоні з бічним змішуванням припливу СВ. Хоффман та ін. [23] представили спрощену модель на основі «TEMPEST», враховуючи лише передачу тепла від СВ до навколишнього середовища.

Дослідження, засноване на попередній моделі, було представлено Еліас-Максіл та ін. [24], у результаті якого дійшли висновку, що в нестаціонарних умовах модель була більш ніж удвічі точнішою за «TEMPEST», що було пов'язано з урахуванням гідравлічного впливу технічних отворів, іншого порожнього простору та напірного режиму при моделюванні потоку СВ. Сітзенфрей та ін. [25] використовували програму «TEMPEST» для аналізу взаємодії децентралізованих (рівень будівлі) і централізованих (каналізаційної мережі) систем рекуперації тепла СВ. У процесі дослідження дійшли висновку, що продуктивність централізованих систем рекуперації тепла знижується до 40 %, якщо всі помешкання будівлі оснащені децентралізованими системами рекуперації тепла СВ.

Абдель Аал та ін. [26; 27] запропонували спрощену модель динаміки температури СВ, розуміючи, що багато вхідних параметрів у «TEMPEST» мають незначний вплив на зміну температури СВ. Модель включала енергетичний баланс СВ вздовж труби та оцінку коефіцієнтів теплопередачі і припускала, що зміна температури СВ спричинена втратами тепла в повітря всередині каналізаційних труб та навколишній ґрунт. Абдель Аал та ін. показали, що температура повітря в каналізаційній трубі має більший вплив на температуру СВ, а вже потім за впливом йде температура ґрунту навколо труби.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на відмінну роботу програми «TEMPEST» для лінійних колекторів різної довжини, діаметрів, матеріалів труб та типів ґрунтів при під'єднанні до колекторів бокових підключень програма, що використовує числові методи для розв'язку нестаціонарних диференційних рівнянь, інколи дає коливання температур при перемішуванні СВ у місцях підключень (колодязях). Для цього в програмі передбачено згладжування таких явищ за допомогою спеціального фільтра. Такі коливання тривають деякий час на відносно невеличкій довжині колектора. Заради справедливості треба зазначити, що в наших експериментах це спостерігалося лише на початковому етапі (змішування в колодязі № 2). На подальших ділянках, де були колодязі зі змішуванням СВ, майже одразу відбувалося підвищення температури суміші на 0,5-1,5 ^{o}C залежно від співвідношення витрат СВ, що змішуються, за рахунок припливу потоку більш «гарячих» СВ. З метою уникнення цього явища в результатах нами було запропоновано застосувати відносно прості та зрозумілі заходи, послідовність яких утворила методику проведення і оброблення результатів комп'ютерного експерименту.

Мета й завдання досліджень. Метою цієї статті є ознайомлення з можливостями програмного продукту «TEMPEST» версії 1.02 [20] для дослідження температурного режиму СВ в каналізаційних колекторах. Також метою досліджень було розроблення методики визначення потенціалу теплової енергії СВ у каналізаційних колекторах із застосуванням програми «TEMPEST» та електронної таблиці «MS Excel».

Виклад основного матеріалу. Дослідження на основі програмного продукту TEMPEST, версія 1.02 якого була люб'язно надана Національному університету водного господарства та природокористування (НУВГП) науковцями з Швейцарського федерального інституту водних наук та технологій (EAWAG, Цюрих) було проведено моделювання температурного режиму СВ на прикладі внутрішньодворової мережі каналізації гуртожитків № 7 та 8 НУВГП у місті Рівне по вул. Студентській, 6 та 8 (рис. 3) з метою розрахунку потенційної кількості тепла СВ у каналізаційній мережі для утилізації на потреби ГВП для мешканців гуртожитків.

На рис. 3 зображена схема дворової каналізаційної мережі К1 гуртожитків № 7 (поз. 2) та № 8 (поз. 1), яка була об'єктом дослідження. На схемі нанесені номера колодязів та діаметри трубопроводів. Висотні відмітки люків колодязів, верху та низу (лотків)

труб каналізації, що були отримані з матеріалів топогеодезичних вишукувань, довжини ділянок та витрати СВ, на схемі (рис. 3) не нанесені, щоб не захаращувати її, але всі вони були використані як вихідні дані для програми «TEMPEST».

Вводилися змінні – витрата і температура СВ на ділянці, коефіцієнт повітрообміну, температура і вологість повітря в каналізаційному просторі, температура навколишнього ґрунту. Гідравліка СВ моделюється рівняннями Сент-Венана, а аеродинаміка потоку повітря - розробленою моделлю для круглих труб. Розглянуті в моделі процеси тепло- і масообміну наведені на рис. 2. Складні за конфігурацією каналізаційні мережі моделювалися серією елементів «вузол + канал». Процеси, що використовуються в рівняннях балансу математичної моделі, докладно описані в таблиці А.2 [20]. Повна математична модель, яка реалізована в «TEMPEST», описана та обговорена в публікаціях [18; 19; 21], а її огляд наведено в [20].

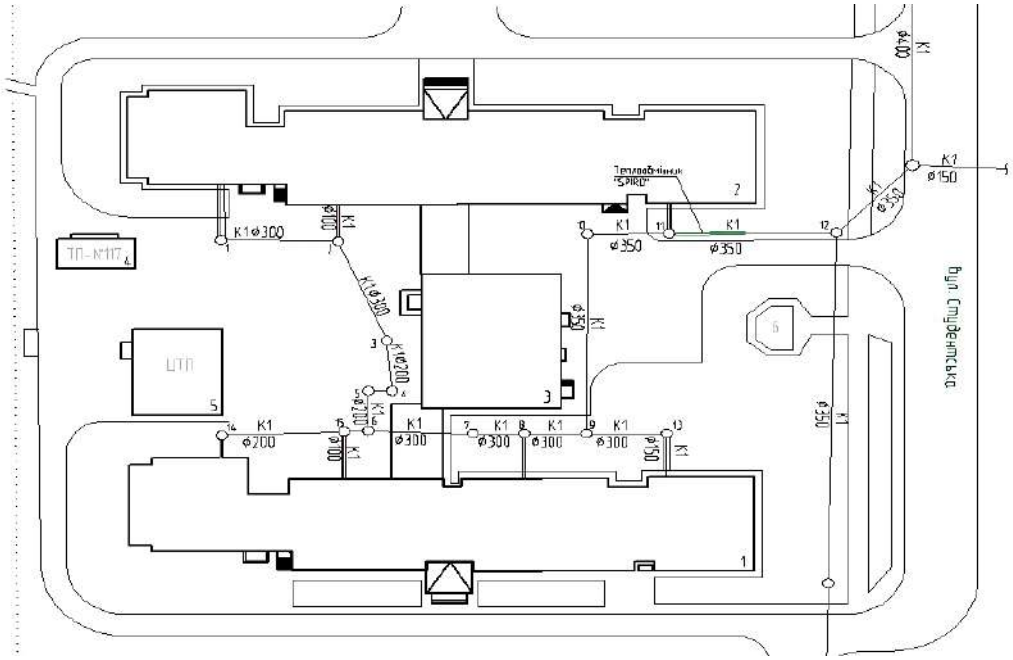


Рис. 3. План-схема дворової каналізаційної мережі гуртожитків № 7 та 8 НУВГП

Для холодного та теплого періодів року було відібрано параметри, що наведені в таблиці 1. Ці дані вводяться як вихідні в діалогове вікно програми «TEMPEST» (рис. 4).

Таблиця 1 – Вихідні параметри для розрахунків в холодний та теплий період

Показники	Значення	
	холодний	теплий
Температура вихідних СВ з випусків гуртожитків, ^{0}C	30	
Температура повітря навколишнього середовища, ^{0}C	5	15
Коефіцієнт вологості, ph A	0,9	
Атмосферний тиск, мбар	786	
Коефіцієнт повітрообміну, b	0,001	
Швидкість розкладання ХПК, mg COD/(m^3*s), r	2,8	
Глибина проникнення тепла в ґрунт (навколо труби), м, ΔS	0,1	
Температура ґрунту (навколо труби), ^{0}C, TS	6	11

Джерело: розроблено авторами.

Коефіцієнт повітрообміну в колодязях прийнятий 0,001, тому що на цих ділянках мережі всі каналізаційні колодязі перекриті люками, які не мають отворів, тому повітрообмін і відповідно втрати тепла з повітрям із колодязя є мінімальними. Крім того, рельєф ділянки рівний, а ухили трубопроводів на ділянках не дуже великі, що не створює для повітря в каналізаційних трубах природної витяжки і руху повітря в них.

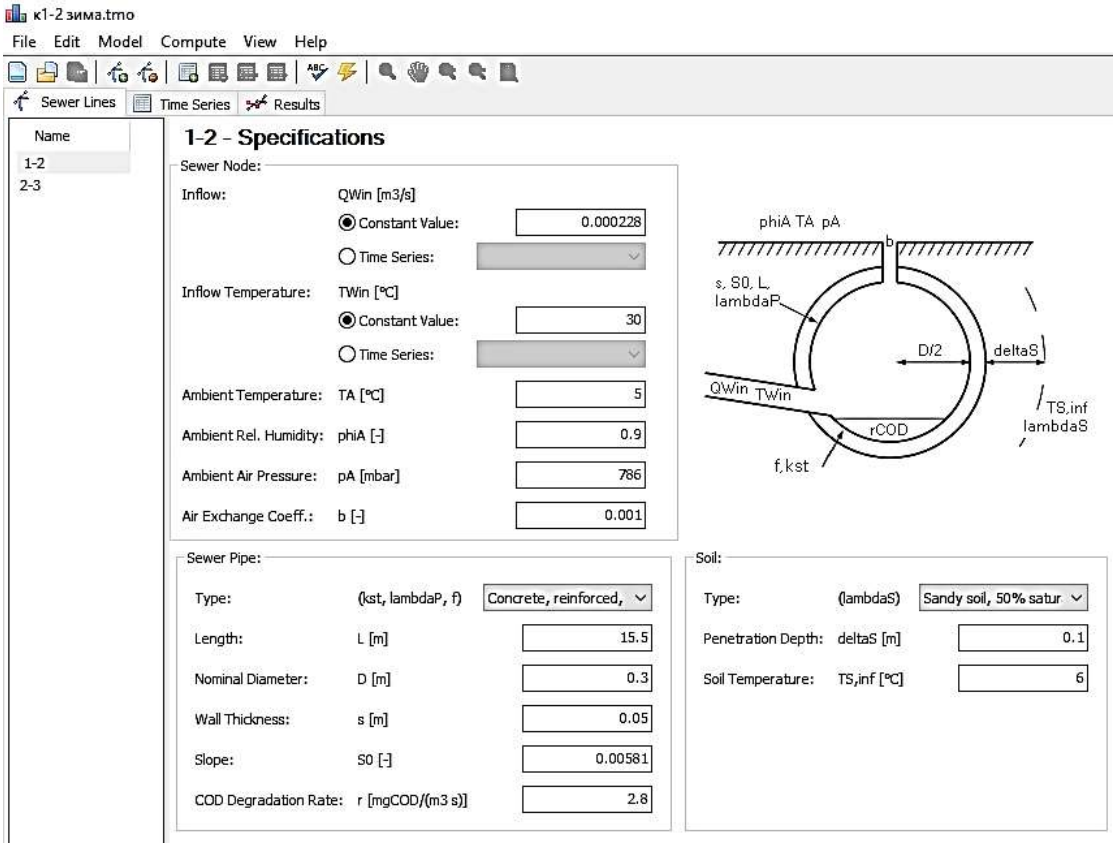


Рис. 4. Вікно «Sewer Lines» програми «TEMPEST» з вихідними даними ділянки 1-2

Далі наводиться детальний опис проходження СВ по найдовшому маршруту дворової мережі – від колодязя № 1, через колодязі 2-11, до колодязя № 12 (рис. 3) з одночасним занесенням вихідних даних для розрахунку температур СВ для кожної новоствореної ділянки дворової каналізації або групи ділянок у програму «TEMPEST» (рис. 4). Після введення даних проводився розрахунок в розділі *Compute* і перегляд результатів в розділі *Results*. Результати розрахунків заносилися у відповідні комірки електронних таблиць «MS Excel» (табл. 2, 3).

Таблиця 2 – Результати розрахунків температур СВ і потужності теплової енергії, яку можна рекуперувати на ділянках каналізаційної мережі в холодний період року

№	Довжина, м	Витрата СВ, дм^3/с	Діаметр труби, мм	Температура стічних вод Т, ° С			Потужність теплової енергії, кВт що			
				початок	закінчення	зменшення	втрачається	може бути рекуперована, ΔТ = 5°С	ΔТ = 10°С	ΔТ = 15°С
1-2	15,5	0,228	300	30,00	27,60	2,40	2,3	4,8	9,6	14,3
2-3	17,0	0,456	300	29,00	27,50	1,50	2,9	9,6	19,1	28,7
3-6	19,0	0,456	200	27,50	25,70	1,80	3,4	9,6	19,1	28,7
14-15	16,5	0,171	200	30,00	28,20	1,80	1,3	3,6	7,2	10,7
15-6	3,5	0,342	200	29,10	28,30	0,80	1,1	7,2	14,3	21,5
6-8	21,0	0,798	300	26,80	25,80	1,01	3,4	16,7	33,4	50,2
8-9	8,5	0,969	300	26,50	26,20	0,34	1,4	20,3	40,6	60,9
13-9	11,0	0,171	300	30,00	28,50	1,50	1,1	3,6	7,2	10,7
9-10	43,0	1,140	350	26,50	25,00	1,55	7,4	23,9	47,8	71,6
10-12	22,5	1,368	350	25,80	24,70	1,13	6,5	28,7	57,3	86,0

Таблиця 3 – Результати розрахунків температур СВ та потужності теплової енергії, яку можна рекуперувати на ділянках каналізаційної мережі в теплий період року

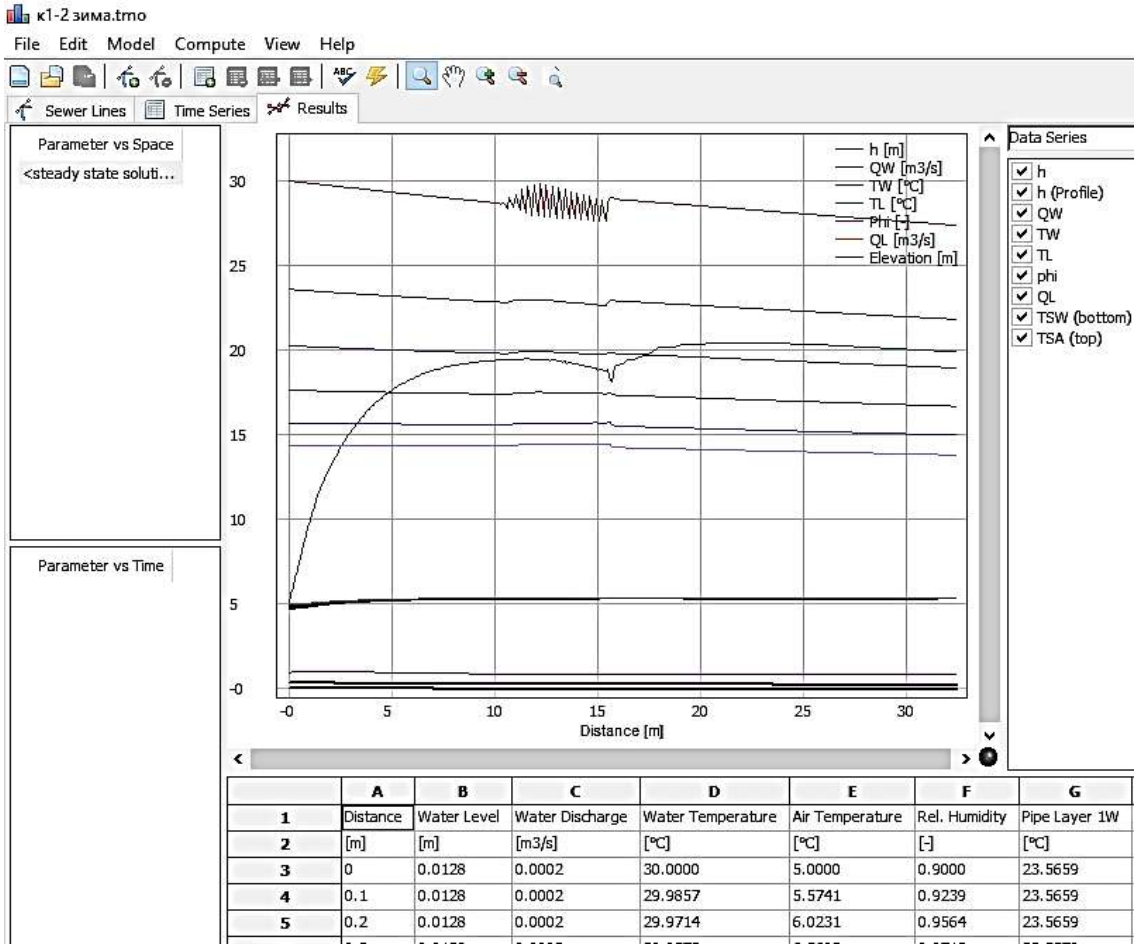
№	Довжина, м	Витрата СВ, дм^3/с	Діаметр труби, мм	Температура стічних вод Т, ° С			Потужність теплової енергії, кВт що			
				початок	закінчення	зменшення	втрачається	може бути рекуперована,		
								ΔТ = 5° С	ΔТ = 10° С	ΔТ = 15° С
1-2	15,5	0,228	300	30,0	28,7	1,30	1,2	4,8	9,6	14,3
2-3	17,0	0,456	300	29,1	27,9	1,20	2,3	9,6	19,1	28,7
3-6	19,0	0,456	200	27,9	26,5	1,40	2,7	9,6	19,1	28,7
14-15	16,5	0,171	200	30,0	28,1	1,90	1,4	3,6	7,2	10,7
15-6	3,5	0,342	200	29,1	28,7	1,30	0,5	7,2	14,3	21,5
6-8	21,0	0,798	300	27,4	27,1	0,34	1,1	16,7	33,4	50,2
8-9	8,5	0,969	300	28,1	27,9	0,20	0,8	20,3	40,6	60,9
13-9	11,0	0,171	300	30,0	28,9	1,10	0,8	3,6	7,2	10,7
9-10	43,0	1,140	350	28,1	26,9	1,15	5,5	23,9	47,8	71,6
10-12	22,5	1,368	350	27,4	26,5	0,92	5,3	28,7	57,3	86,0

У гуртожитках НУВГП № 7 та 8 є 7 каналізаційних випусків (з двох будинків). За розподілом споживачів води в гуртожитках середньодобова витрата СВ по кожному з трьох випусків гуртожитку № 7 становила 0,228 дм^3/с, а по кожному з чотирьох випусків гуртожитку № 8 – 0,171 дм^3/с. В каналізаційний колодязь № 1 з випуску гуртожитку № 7 (рис. 2, поз. 2 на генплані) надходять СВ з витратою 0,228 дм^3/с. Температура СВ на виході з будинку приймається – 30 ^{0}С. Далі СВ проходять дистанцію 15,5 м до колодязя № 2 по трубі Ø 300 мм. За результатами розрахунків в програмі «TEMPEST» наприкінці ділянки 1-2 температура СВ у холодний період року становить 27,6 ^{0}С, що відображено на рис. 5, а в теплий – 28,7 ^{0}С (табл. 3).

На рис. 4 видно, що у вікні *«Sewer Lines»* знаходяться дві ділянки 1-2 та 2-3. Програма «TEMPEST» дозволяє додавати до попередніх ділянок нові, які є їхнім продовженням, якщо їхні конструктивні та інші параметри математичної моделі однакові, а витрата та температура СВ можуть відрізнятися. Витрата суміші СВ у міру просування по колектору постійно зростає, а температура коливається – остигає і знижується або зростає коли до неї додаються СВ з більшою температурою ніж у суміші. Змішування потоків СВ, у мережі, що розглядається (рис. 3), відбувається в колодязях 2, 15, 6, 8, 9 і 11. На рис. 5, 6 та 8 можна побачити характерні «стрибки» температури суміші СВ у колодязях, у яких відбувається змішування.

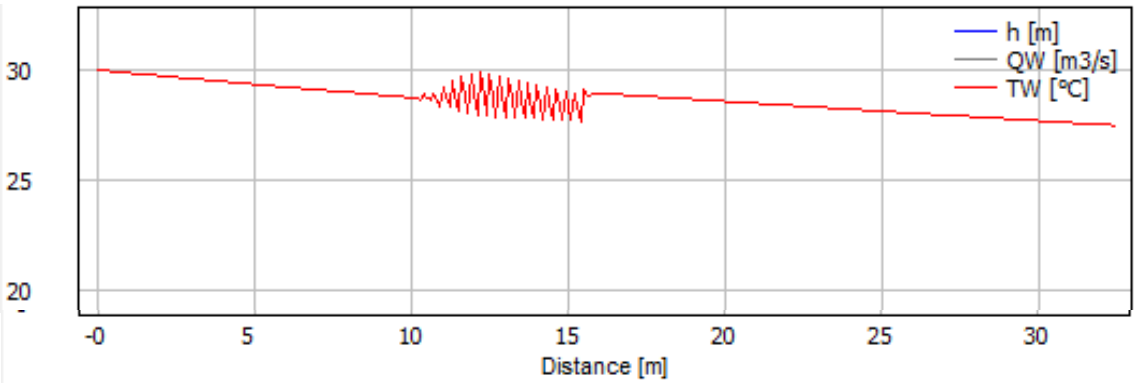
У колодязь № 2 підведена труба Ø 100 мм випуску гуртожитку № 7 з вихідною температурою СВ 30 ^{0}С і витратою 0,228 дм^3/с. Потоки СВ змішуються та прямують далі до колодязя № 3 по трубопроводу Ø 300 мм довжиною 17 м. За результатами розрахунків в програмі «TEMPEST» на виході з колодязя № 2 температура суміші СВ, у холодний період року становить 29,0 ^{0}С, що видно на рис. 5 та 6, а в теплий – 29,1 ^{0}С (табл. 3).

На рис. 5 наведена комбінована інформація у вікні «Results» з максимальною кількістю графіків та «легенди» для неї (9 параметрів), а також частина табличної інформації (всього 17 параметрів) з цифровими результатами розрахунку для стаціонарного випадку ділянки 1-3 з кроком 0,1 м по довжині колектору в холодний період року. Оскільки нас цікавить переважно температура СВ у мережі (шкала зліва в °С), то на наступних графіках буде наводитися лише вона на різних ділянках. Більш детально про всі параметри, які можна вивести в результатах, можна прочитати в [20].



	A	B	C	D	E	F	G
1	Distance	Water Level	Water Discharge	Water Temperature	Air Temperature	Rel. Humidity	Pipe Layer 1W
2	[m]	[m]	[m3/s]	[°C]	[°C]	[-]	[°C]
3	0	0.0128	0.0002	30.0000	5.0000	0.9000	23.5659
4	0.1	0.0128	0.0002	29.9857	5.5741	0.9239	23.5659
5	0.2	0.0128	0.0002	29.9714	6.0231	0.9564	23.5659

Рис. 5. Вигляд вікна «Results» результатами розрахунку ділянки 1-2



Довжина ділянки каналізаційної мережі, м

Рис. 6. Температура СВ у мережі (шкала зліва) на ділянці 1-3 в холодний період року

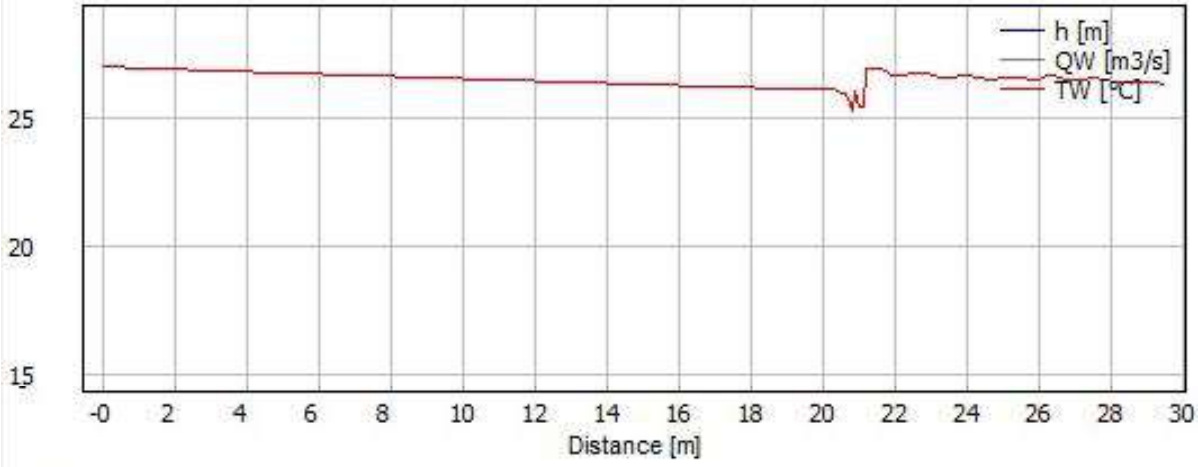
Як видно з рис. 5, 6 майже посередині графіка спостерігаються коливання значень температури СВ протягом 5 м - з 11 по 16 м траси колектору. Цифрові значення температур СВ також свідчать про це. Наприкінці цієї зони розташований колодязь № 2, у якому відбувається перемішування двох однакових за витратою потоків СВ з ділянки 1-2 та випуску №2. Одразу за колодязем № 2 коливання параметрів температур припиняються, значення температури суміші СВ дещо зростає, бо з випуску № 2 додалися більш «гарячі» СВ, ніж «охолоджені» СВ з ділянки 1-2, а потім температура суміші СВ починає зменшуватися по мірі просування і охолодження на ділянці 2-3.

Вслід за цим у програмі обраховується зміна температури СВ на ділянці 3-6. Оскільки колодязі № 4 та 5 є поворотними і транзитними (без випусків СВ у них), ділянки мають однаковий діаметр, нахил труб, повітрообмін тощо, тому дана частина мережі К1 (3–6) розраховується, як одна ділянка без під'єднань. Витрата СВ на виході і виході з колодязя № 3 становить 0,456 дм^3/с, температура СВ у холодний період року 27,5 ^{0}С, а в теплий – 27,9 ^{0}С. СВ проходять шлях довжиною в 19 м до колодязя № 6 (рис. 3). Розрахована температура СВ на вході в колодязь № 6 у холодний період року (табл. 2, рис. 6) становить 25,7 ^{0}С та в теплий – 26,5 ^{0}С (табл. 3).

Оскільки жодних потоків СВ на трасі 3-6 не додається, то графік температури СВ є суцільною спадаючою лінією без коливань і перепадів температури і в цій статті не наводиться. Розрахована температура СВ на вході в колодязь № 6 у холодний період року (табл. 2) становить 25,7 ^{0}С та в теплий – 26,5 ^{0}С (табл. 3).

СВ каналізаційної мережі гуртожитку № 7 змішуються з СВ системи каналізації гуртожитку № 8 (колодязі № 14 і 15) спочатку в колодязі № 6, що дає збільшення витрати та температури СВ. Випуск, спрямований у колодязь № 14, має витрату 0,171 дм^3/с. Цей потік проходить по трубі Ø 200 мм відстань в 16,5 м до колодязя № 15, в який здійснюється ще один випуск СВ. Потік суміші СВ з витратою 0,342 дм^3/с з колодязя № 15 через 3,5 м потрапляє в колодязь № 6 і перемішується з потоком СВ, що надходить з гуртожитку № 7 з витратою 0,456 дм^3/с. Температури потоків СВ на входах та виходах вказаних колодязів наведені у табл. 2 і 3.

Потоки СВ з колодязів № 14, 15 та 3 об’єднуються в колодязі № 6 і далі розраховуються як один потік з витратою 0,798 дм^3/с, що прямує до колодязя № 8 по ділянці довжиною 21 м. Колодязь № 7 – проміжний (оглядовий). Даний потік СВ перемішується в колодязі № 8 з випуском СВ з витратою 0,171 дм^3/с. Для подальших розрахунків приймаємо на виході з нього витрату суміші СВ 0,969 дм^3/с. Далі СВ прямують по трубі Ø 300 мм і протяжністю 8,5 м до колодязя №9. Результати розрахунку по ділянці 6-9 каналізаційної мережі наведено на рис. 7. Температури потоків СВ на входах та виходах вказаних колодязів для різних періодів року наведені в табл. 2 і 3.



Довжина ділянки каналізаційної мережі, м

Рис. 7. Температура СВ у мережі (шкала зліва) на ділянці 6-9 в холодний період року

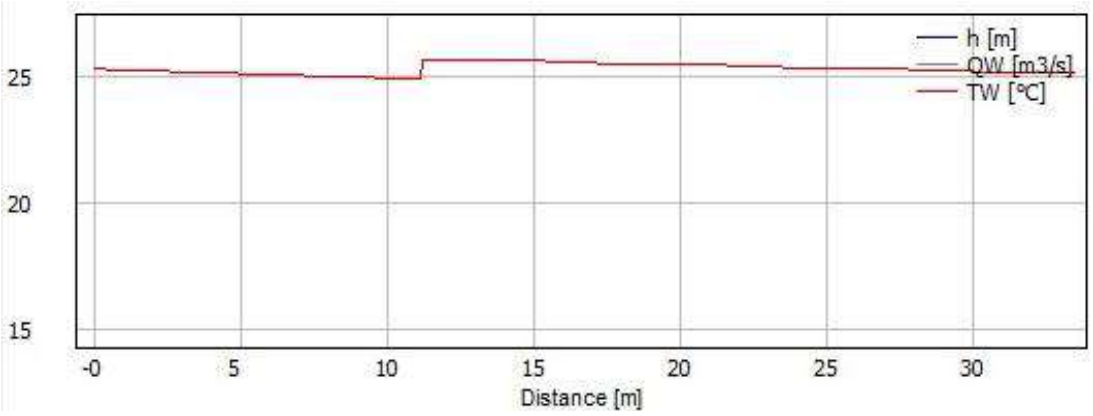
Наступна ділянка розрахунку 13-9 має випуск, спрямований у колодязь № 13 з початковою температурою СВ 30 ^{0}С і витратою 0,171 дм^3/с. Від колодязя № 13 СВ проходять дистанцію 11 м до колодязя № 9 по трубі Ø 300 мм. Жодних потоків СВ по трасі не додається. Графік температури СВ є суцільною спадаючою лінією. Результати розрахунків відображено на рис. 8 та в табл. 2 і 3.

Довжина ділянки каналізаційної мережі, м

Рис. 8. Температура СВ у мережі (шкала зліва) на ділянці 13-9 у холодний період року

Вслід за цим у колодязі № 9 відбувається перемішування потоків СВ від колодязів № 8 і № 13. Сумарна витрата потоків складає 1,140 дм^3/с. Від колодязя № 9 до колодязя № 10 СВ проходять дистанцію 32 м по трубі Ø 350 мм. Жодних потоків СВ по трасі не додається, тому графік температури СВ є суцільною спадаючою лінією. Результати розрахунків відображено в табл. 2 і 3.

Відстань від колодязя № 10 до колодязя № 11 становить 11 м, діаметр труб – 350 мм, витрата СВ – 1,140 дм^3/с. У колодязь № 11 під'єднаний випуск СВ з гуртожитку № 7 з температурою СВ 30 ^{0}С та витратою 0,228 дм^3/с, що призведе до перемішування СВ, а відповідно й до підвищення температури їх суміші. Діаметр труб на ділянці 11-12 становить 350 мм, а довжина 22,5 м. На ділянці відбувається злиття потоків СВ від обох гуртожитків, що видно на рис. 9. Загальна розрахункова витрата СВ становить 1,368 дм^3/с.



Довжина ділянки каналізаційної мережі, м

Рис. 9. Температура СВ у мережі (шкала зліва) на ділянці 10-12 в холодний період року

Як показує розрахунок, температура суміші СВ на вході в колодязь № 12 становить 25,0 ^{0}С у холодний період року та 26,5 ^{0}С – у теплий.

У таблицях 2 і 3 представлені основні вихідні дані для ділянок, що необхідні для розрахунків температури СВ, пораховані програмою «TEMPEST» значення температури СВ в характерних точках ділянок мережі (початок і закінчення), а також величини теплових потужностей, які втрачаються під час руху СВ по даній ділянці, та можуть бути використані для потреб ГВП гуртожитків при різних рівнях вилучення тепла з СВ (зменшеннях їх температури на 5; 10 та 15 ^{0}С теплообмінником холодного контуру ТНУ) пораховані за допомогою «MS Excel».

Висновки. Виконаний аналіз математичних моделей та комп'ютерних програм для розрахунку температурного режиму СВ у каналізаційних мережах.

Визначені температурні профілі СВ у каналізаційній мережі для холодного й теплого періодів року.

На основі моделювання в програмі «TEMPEST» та з допомогою «MS Excel» визначені потужності і втрати теплової енергії на всіх ділянках дворової каналізаційної мережі та можливі потужності для рекуперації низькопотенційного тепла і перетворення його в ТНУ у високопотенційне для потреб ГВП двох гуртожитків НУВГП.

Результати досліджень будуть використані для проєктування теплогенеруючого пункту на базі ТНУ, баків-акумуляторів гарячої води тощо, для якого джерелом тепла будуть СВ дворової каналізаційної мережі двох гуртожитків. В теплий період року з неї можна отримати близько 86 кВт теплової енергії при відборі тепла і зниженні температури СВ на останній, найбільш заповненій СВ, ділянці мережі на 15 °С.

У подальших дослідженнях планується перевірка адекватності математичної моделі, яку використовує програма «TEMPEST», шляхом проведення натурних обстежень температурного режиму СВ дворової каналізаційної мережі гуртожитків та визначення теплового потенціалу об’єктів каналізації, передусім колекторів, населених пунктів України, які були збудовані або реконструйовані за проєктами НУВГП.

Перехід на відновлювані джерела енергії дасть можливість зекономити значні об’єми природного газу, від якого можна відмовитись, якщо використовувати теплову енергію СВ за допомогою ТНУ.

Список використаних джерел

1. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. (2018). *PE/48/2018/REV/1*, pp. 82–209. – Accessed mode: http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj.

2. Heat Recovery from wastewater - a review of available resource [Electronic resource] / H. Nagpal, J. Spriet, M.K. Murali, A. McNabola // Water. – 2021. – Vol. 13. – Accessed mode: https://doi.org/10.3390/w13091274.

3. Титарь С. С. Использование сбросного тепла в системе автономного теплоснабжения жилых зданий / С. С. Титарь, А. А. Климчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2011. – № 6. – С. 121-125.

4. Денисова А. Є. Перспективи використання скидних вод для теплопостачання / А. Є. Денисова, О. М. Троїцький // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2011. – № 6. – С. 126-131.

5. Meggers F. The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump [Electronic resource] / F. Meggers, H. Leibundgut // Energy and Buildings. – 2011. – № 43. – Pp. 897–886. Accessed mode: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.008.

6. A renewable heat solution for water ingress in the Glasgow subway tunnel system [Electronic resource] / H. Nicholas, N. Konstantinos, E. Rohinton, A. Bjorn, Y. Paul // Conference: Energy and sustainability. – 2014. – Accessed mode: https://doi.org/10.2495/ESUS140141.

7. A heat energy recovery system from tunnel wastewater [Electronic resource] / N. Hytiris, K. Ninikas, R. Emmanuel, B. Aaen, P.L. Younger // Environmental Geotechnics. – 2018. № 5(5). – Pp. 300–308. – Accessed mode: https://doi.org/10.1680/jenge.15.00087.

8. An experimental setup for the analysis of an energy recovery system from wastewater for heat pumps in civil buildings [Electronic resource] / L. Postrioti, G. Baldinelli, F. Bianchi, G. Buitoni, F.D. Maria, F. Asdrubali // Applied Thermal Engineering. – 2016. – № 102. – Pp. 961-971. – Accessed mode: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.016.

9. Technologies for recovery of energy from wastewaters: Applicability and potential in South Africa [Electronic resource] / Stafford W., Cohen B., Pather-Elias S., von Blottnitz H., van Hille R., Harrison S. T. L., Burton S. G. // Journal of energy in Southern Africa. – 2013. – № 24(1). – Pp. 15-26. – Accessed mode: https://dx.doi.org/10.17159/2413-305-1/2014/v24i1a3003.

10. Zhu J.J. Modeling and spatial optimization of wastewater-source heat pump implementation in a wastewater collection system [Electronic resource] / J.J. Zhu, X. Wang, P.R. Anderson // Urban Water Journal. – 2019. – № 16(10). – Pp. 698-708. – Accessed mode: https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1726410.

11. Energy Recovery from Wastewater: A Study on Heating and Cooling of a Multipurpose Building with Sewage-Reclaimed Heat Energy [Electronic resource] / D. Cecconet, J. Racek, A. Callegari, P. Hlavínek // Sustainability. – 2020. – № 12(116). – Accessed mode: https://doi.org/10.3390/su12010116.

12. A review on potential use of low-temperature water in the urban environment as a thermal-energy source [Electronic resource] / J. Laanearu, A. Borodinecs, M. Rimeika, B. Palm // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – № 251. – Accessed mode: https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012054.

13. From the Wastewater Treatment Plant to the Turnstiles of Urban Water and District Heating Networks [Electronic resource] / W. Gruber-Glatzl, C. Brunner, S. Meitz, H. Schnitzer // Frontiers in Sustainable Cities. – 2020. – Accessed mode: https://doi.org/10.3389/frsc.2020.523698.

14. Suitability Pre-Assessment of in-Sewer Heat Recovery Sites Combining Energy and Wastewater Perspectives [Electronic resource] / F. Huber, G. Neugebauer, T. Ertl, F. Kretschmer // Energies. – 2020. – № 13. – Accessed mode: https://doi.org/10.3390/en13246680.

15. Кізєєв М. Д. Використання теплових насосів при реконструкції систем опалення будівель фільтрів станцій водопідготовки / М. Д. Кізєєв, І. В. Чабан // Вісник Одеської державної академії будівництва. – 2015. – № 59. – С. 64-69.

16. Кожушко О. Д. Утилізація теплової енергії стічних вод та питної води в системах водопостачання і каналізації населених пунктів [Електронний ресурс] / О. Д. Кожушко, М. Д. Кізєєв // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – 2017. – № 7. – С. 94-100. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2017_7_16.

17. Energy recovery from the water cycle: Thermal energy from drinking water [Electronic resource] / van der Hoek, J. P., Mol, S., Giorgi, S, Ahmad, J, I., Liu, G., & Medema, G. // Energy. – 2018. – № 162. – Pp. 977-987. – Accessed mode: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.097.

18. Dürrenmatt D. J. Berechnung des Verlaufs der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr : Master's Thesis [Electronic resource] / Dürrenmatt D.J. – Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2006. – Accessed mode: https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:12981.

19. Dürrenmatt D. Simulation of the wastewater temperature in sewers with TEMPEST [Electronic resource] / Dürrenmatt, D., & Wanner, O. // Water Science & Technology. – 2008. – № 57(11). – Pp. 1809-1815. – Accessed mode: https://doi.org/10.2166/wst.2008.291.

20. Dürrenmatt D. TEMPEST. Computer Program for the Simulation of the Wastewater Temperature in Sewers. Version 1.02 [Electronic resource] / D. Dürrenmatt, O. Wanner // User Manual. – 2012. – Accessed mode: https://www.eawag.ch/en/department/eng/software/.

21. Durrenmatt D. A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers [Electronic resource] / D. Dürrenmatt, O. Wanner // Water Research. – 2014. – № 48. – Pp. 548-558. – Accessed mode: https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.017.

22. Ali S. Determining the UK's potential for heat recovery from wastewater using steady state and dynamic modelling-preliminary results [Electronic resource] / S. Ali, A. Gillich // Proceedings in Energy. – 2018. – № 5. – Pp. 107-121. – Accessed mode: https://openresearch.lsbu.ac.uk/download/27833bbc077813a232059703d7f32a847dbf30b1a8c7f92a8da6c1a65437e2ba/787271/Determining%20the%20UKs%20potential%20for%20heat%20recovery%20from%20wastewater%20using%20steady%20state%20and%20dynamic%20modelling%20-%20preliminary%20results_%20%2800000002%29.pdf.

23. Modelling of Thermal Energy Balance in Sewer Systems / J. Hofman, M. Bloemendal, B. Wols, C. Agudelo-Vera, J. Elias Maxil, P. Boderie, M. Nijman, J.P. van der Hoek. – 2014. – Accessed mode: http://resolver.tudelft.nl/uuid:e31f2cc8-a39b-49a2-bd41-c0685bea369d.

24. Development and performance of a parsimonious model to estimate temperature in sewer networks [Electronic resource] / J.A. Elías-Maxil, J. Hofman, B. Wols, F. Clemens, J.P. van der Hoek, L. Rietveld // Urban Water Journal. – 2017. – № 14. – Pp. 829–838. – Accessed mode: https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1276811.

25. Sitzenfrei R. Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems [Electronic resource] / R. Sitzenfrei, S. Hillebrand, W. Rauch // Water Science & Technology. – 2017. – № 75. – Pp. 1243–1250. – Accessed mode: https://doi.org/10.2166/wst.2016.598.

26. Modelling the viability of heat recovery from combined sewers [Electronic resource] / M. Abdel-Aal, R. Smits, M. Mohamed, K. De Gussem, A. Schellart, S. Tait // Water Science & Technology. – 2014. – № 70(2). – Pp. 297-306. – Accessed mode: https://doi.org/10.2166/wst.2014.218.

27. Using Long Term Simulations to Understand Heat Transfer Processes during Steady Flow Conditions in Combined Sewers [Electronic resource] / M. Abdel-Aal, S. Tait, M. Mohamed, A. Schellart // Water. – 2021. – № 13(570). – Accessed mode: https://doi.org/10.3390/w13040570.

References

1. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. (2018). *PE/48/2018/REV/1*, 82–209. http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj

2. Nagpal, H., Spriet, J., Murali, M.K., & McNabola, A. (2021). Heat Recovery from wastewater - a review of available resource. *Water, 13.* https://doi.org/10.3390/w13091274

3. Titar, S.S. & Klimchuk, A.A. (2011). Ispolzovanie sbrosnogo tepla v sisteme avtonomnogo teplosnabzheniya zhilih zdanii. [The use of waste heat in the system of autonomous heating of residential buildings]. *Visnik Nacionalnogo tehnichnogo universitetu "Kharkivskii politehnichnii institut". Energetichni ta teplotehnichni procesi i ustatkuvannya - Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Energy and heat engineering processes and equipment, 6*, 121-125.

4. Denysova, A.Ie. & Troitskyi, O.M. (2011). Perspektyvy vykorystannia skydnykh vod dlia teplopostachannia. [Prospects for the use of wastewater for heat supply]. *Visnik Nacionalnogo tehnichnogo universitetu "Kharkivskii politehnichnii institut". Energetichni ta teplotehnichni procesi i ustatkuvannya - Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Energy and heat engineering processes and equipment, 6*, 126-131.

5. Meggers, F., & Leibundgut, H. (2011). The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Buildings, 43,* 897–886. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.008.

6. Nicholas, H., Konstantinos, N., Rohinton, E., Bjorn, A., & Paul, Y. (2014). A renewable heat solution for water ingress in the Glasgow subway tunnel system. *Conference: Energy and sustainability*. https://doi.org/10.2495/ESUS140141.

7. Hytiris, N., Ninikas, K., Emmanuel, R., Aaen, B., & Younger, P.L. (2018). A heat energy recovery system from tunnel wastewater. *Environmental Geotechnics, 5*(5), 300–308. https://doi.org/10.1680/ jenge.15.00087.

8. Postrioti, L., Baldinelli, G., Bianchi, F., Buitoni, G., Maria, F.D., & Asdrubali, F. (2016). An experimental setup for the analysis of an energy recovery system from wastewater for heat pumps in civil buildings. *Applied Thermal Engineering. 102*, 961-971. https://doi.org/10.1016/ j.applthermaleng.2016.04.016.

9. Stafford, W., Cohen, B., Pather-Elias, S., von Blottnitz, H., van Hille, R., Harrison, S. T. L., & Burton, S. G. (2013). Technologies for recovery of energy from wastewaters: Applicability and potential in South Africa. *Journal of energy in Southern Africa*, *24*(1), 15-26. https://dx.doi.org/10.17159/2413-305-1/2014/v24i1a3003.

10. Zhu, J.J., Wang, X., & Anderson, P.R. (2019). Modeling and spatial optimization of wastewater-source heat pump implementation in a wastewater collection system. *Urban Water Journal, 16*(10), 698-708. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1726410.

11. Cecconet, D., Racek, J., Callegari, A. & Hlavínek, P. (2020). Energy Recovery from Wastewater: A Study on Heating and Cooling of a Multipurpose Building with Sewage-Reclaimed Heat Energy, *Sustainability, 12*(116). https://doi.org/10.3390/su12010116.

12. Laanearu, J., Borodinecs, A., Rimeika, M., & Palm, B. (2017). A review on potential use of low-temperature water in the urban environment as a thermal-energy source. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 251*. https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012054.

13. Gruber-Glatzl, W., Brunner, C., Meitz, S. & Schnitzer, H. (2020). From the Wastewater Treatment Plant to the Turnstiles of Urban Water and District Heating Networks, *Frontiers in Sustainable Cities*. https://doi.org/10.3389/frsc.2020.523698.

14. Huber, F., Neugebauer, G., Ertl, T. & Kretschmer, F. (2020). Suitability Pre-Assessment of in-Sewer Heat Recovery Sites Combining Energy and Wastewater Perspectives. *Energies, 13*. https://doi.org/10.3390/en13246680.

15. Kizyeyev, M.D., & Chaban, I.V. (2015). Vykorystannia teplovykh nasosiv pry rekonstruktsii system opalennia budivel filtriv stantsii vodopidhotovky [The use of heat pumps in the reconstruction of heating systems of filter buildings of water treatment stations]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva – Bulletin of the Odessa State Academy of Construction, 59,* 64-69.

16. Kozhushko, O. D., & Kizyeyev, M. D. (2017). Utylizatsiia teplovoi enerhii stichnykh vod ta pytnoi vody v systemakh vodopostachannia i kanalizatsii naselenykh punktiv. [Utilization of thermal energy of waste water and drinking water in water supply and sewage systems of settlements]. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi – Modern technologies and calculation methods in construction*, 7, 94-100. http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2017_7_16.

17. van der Hoek, J. P., Mol, S., Giorgi, S, Ahmad, J, I., Liu, G., & Medema, G. (2018). Energy recovery from the water cycle: Thermal energy from drinking water, *Energy, 162*, 977-987. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.097.

18. Dürrenmatt, D.J. (2006). Berechnung des Verlaufs der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr. *Master's Thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.* https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/ islandora/object/eawag:12981.

19. Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2008). Simulation of the wastewater temperature in sewers with TEMPEST. *Water Science & Technology, 57*(11), 1809-1815. https://doi.org/10.2166/wst.2008.291.

20. Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2012). TEMPEST. Computer Program for the Simulation of the Wastewater Temperature in Sewers. Version 1.02. *User Manual.* https://www.eawag.ch/en/department/ eng/software/.

21. Durrenmatt, D., & Wanner, O. (2014). A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research, 48,* 548-558. https://doi.org/ 10.1016/j.watres.2013.10.017.

22. Ali, S., & Gillich, A. (2018). Determining the UK's potential for heat recovery from wastewater using steady state and dynamic modelling-preliminary results. *Proceedings in Energy, 5,* 107-121. https://openresearch.lsbu.ac.uk/download/27833bbc077813a232059703d7f32a847dbf30b1a8c7f92a8da6c1a65437e2ba/787271/Determining%20the%20UKs%20potential%20for%20heat%20recovery%20from%20wastewater%20using%20steady%20state%20and%20dynamic%20modelling%20-%20preliminary%20results_%20%2800000002%29.pdf.

23. Hofman, J., Bloemendal, M., Wols, B., Agudelo-Vera, C., Elias Maxil, J., Boderie, P., Nijman, M., & van der Hoek, J.P. (2014). Modelling of Thermal Energy Balance in Sewer Systems. http://resolver.tudelft.nl/uuid:e31f2cc8-a39b-49a2-bd41-c0685bea369d.

24. Elías-Maxil, J.A., Hofman, J., Wols, B., Clemens, F., van der Hoek, J.P., & Rietveld, L. (2017). Development and performance of a parsimonious model to estimate temperature in sewer networks. *Urban Water Journal, 14*, 829–838. https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1276811.

25. Sitzenfrei, R., Hillebrand, S., & Rauch, W. (2017). Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems. *Water Science & Technology, 75*, 1243–1250. https://doi.org/10.2166/wst.2016.598.

26. Abdel-Aal, M., Smits, R., Mohamed, M., De Gussem, K., Schellart, A., & Tait, S. (2014). Modelling the viability of heat recovery from combined sewers. *Water Science & Technology, 70*(2), 297–306. https://doi.org/10.2166/wst.2014.218.

27. Abdel-Aal, M., Tait, S., Mohamed, M. & Schellart, A. (2021). Using Long Term Simulations to Understand Heat Transfer Processes during Steady Flow Conditions in Combined Sewers. *Water, 13*(570). https://doi.org/10.3390/w13040570.

Отримано 31.05.2022

UDC 621.577.42

Mykola Kizyeyev[1], Mykhailo Kunytskyi[2]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Head of Heat, Gas Supply, Ventilation and Sanitary Engineering Department
National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine)
E-mail: m.d.kizieiev@nuwm.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1491-1695
Scopus Author ID: 57218687201

[2]postgraduate
E-mail: kunytskyi_az16@nuwm.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1700-8167

DETERMINATION OF TEMPERATURE REGIME OF WASTEWATER IN SEWAGE NETWORKS USING THE "TEMPEST" PROGRAM WITH PURPOSE OF HEAT ENERGY RECOVERY

In Ukraine, the operation of boiler houses in the unheated period is inefficient. Therefore, it is practiced to shut down boilers at this time in settlements of Ukraine. This makes it necessary for residents to install apartment heaters for hot water supply.

The shortcomings of the traditional systems of centralized heating and hot water supply were aggravated in the conditions of intense hostilities and systematic enemy shelling of the infrastructure of populated areas. Moreover, everything is happening against the background of rising prices for energy resources, their shortage and the approach of the heating season.

To increase the reliability of the functioning of the energy infrastructure, it is necessary to duplicate centralized sources with autonomous ones, including those based on renewable energy. In order to guarantee the sanitary and epidemiological well-being of the population, together with water supply systems, reliable operation of water drainage systems and heat pumps, which should become sources of low-potential heat in cities, is also necessary.

The purpose of the article is to get acquainted with the possibilities of the «TEMPEST» program for the study of the temperature regime of wastewater, as well as the development of a methodology for determining the thermal energy potential of wastewater in sewage collectors.

A study based on the «TEMPEST» program for calculating the potential amount of thermal energy in the sewer network was conducted on the example of modeling the temperature regime of the yard sewer network of dormitories No. 7 and No. 8 of the National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine). The aim of the study was to determine the amount of thermal energy of wastewater that can be recovered for the needs of hot water supply for residents of dormitories with the help of heat pumps.

***Keywords**: temperature regime of wastewater; heat pump; mathematical model; heat recovery, TEMPEST.*

Fig.: 9. Table: 3. References: 27.

Кізєєв М., Куницький М. Визначення температурного режиму стічних вод у каналізаційних мережах за допомогою програми «Tempest» з метою рекуперації теплової енергії. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 146-161.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-162-167
УДК 502.334.722(477)

***Олександра Гулько*[1]**

[1]кандидат економічних наук, старший викладач кафедри кадастру територій
Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)
E-mail: olesya-72@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1476-6149
ResearcherID: G-7764-2014. **Scopus Author ID:** 57224950357

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТІВ У БРОДІВСЬКОМУ РАЙОНІ

На основі досліджень ерозійної деградації ґрунтів Бродівського району проведено всі необхідні польові досліди особливостей деградованих ґрунтів, лабораторні аналітичні дослідження їхніх фізико-хімічних властивостей та засобами ГІС здійснено моделювання змиву ґрунтів під впливом водної ерозії. Обстежено достатню кількість картографічних та статистичних матеріалів, що дало змогу виконати просторовий та часовий аналіз розвитку ерозійних процесів. Запропоновано рішення до найбільш оптимального безпечного використання ґрунтів досліджуваної території.

Ключові слова: *водна ерозія; деградація ґрунтів; протиерозійні заходи.*
Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. У зв'язку зі зміною структури землекористування різними агротехнологічними підходами ґрунти Бродівського району зазнають значного антропогенного навантаження, що зумовлює насамперед інтенсифікацію водної ерозії. Саме тому дослідження основних факторів, що спричиняють ерозійну деградацію ґрунтів, вивчення морфогенетичних змін у ґрунтах під впливом водної ерозії та моделювання наявного й потенційного водного змиву ґрунтових горизонтів визначають актуальність проведених досліджень. Польові дослідження морфологічних особливостей деградованих ґрунтів, лабораторні аналітичні дослідження їхніх фізичних і фізико-хімічних властивостей моделюють змив ґрунту під впливом водної ерозії. Актуальність цих досліджень також зумовлена тим, що нами вивчено картографічні та описові матеріали структури землекористування в межах цієї ділянки, що дало змогу проаналізувати вплив підходів у землекористуванні на інтенсифікацію водної ерозії та ступінь змиву, а також дало змогу запропонувати рішення до найбільш оптимального екологобезпечного використання фонових ґрунтів території дослідження.

Постановка проблеми. Постановкою проблеми проведення ґрунтових обстежень на ерозійних ділянках ґрунтів, які зумовлені значними змінами у їхніх властивостях, що пов'язано з багатьма зовнішніми факторами, передусім через інтенсифікацію водної ерозії, інтенсивним використанням земель у сільському виробництві, приватизацією земель та зміною меж землекористувачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На початок 30-х років минулого століття сформувалась гіпотеза походження сірих лісових ґрунтів. Вона була сформульована В. Докучаєвим, який вважав, що сірі лісові ґрунти є самостійним ґрунтовим типом, сформованим у результаті своєрідного процесу ґрунтоутворення під широколистяними лісами в кліматичних умовах лісостепу [1]. Цю гіпотезу в різні часи підтримували та розвивали Г. Танфільєв, Р. Різположенський, П. Костичев, М. Сибірцев, Г. Висоцький, І. Фрейберг, П. Коссович, К. Глінка, Н. Ремезов, М. Філатов. Агротехногенні зміни ґрунтів Сокальського пасма (західна лісостепова провінція) під впливом інтенсивного сільськогосподарського використання вивчаються також М. Пшевлоцьким та В. Гаськевичем. Ними встановлено, що в сірих лісових ґрунтах на природний процес ґрунтоутворення накладається культурний (або природно-антропогенний), з яким пов'язана зміна напрямків та інтенсивності елементарних ґрунтових процесів. Це зумовлює переважання антропогенних процесів над природними, тобто природна еволюція даних ґрунтів поступово змінюється культурною. В їхній роботі доведено, що в межах ареалів сірих лісових ґрунтів активізуються процеси водної ерозії (передусім площинного змиву) та розвиваються деградаційні процеси [5]. Зокрема дослідження дерново-карбонатних ґрунтів висвітлено у монографії А. Кирильчука [2]. У 2000-2006 рр. під його

© Гулько О. Р., 2022

керівництвом на дослідних ділянках поблизу міста Радехів та села Білий Камінь проводилось вивчення динаміки елементарних процесів дерново-карбонатних ґрунтів, зміни під їхнім впливом морфологічної будови, складу і властивостей ґрунтів в умовах тривалого сільськогосподарського використання. А власне термін ‘‘ерозія’’, за словами науковця Ю. Наконечного, часто використовується для визначення результатів дії звичайних чинників денудації поверхні Землі – стікаючих вод, вітру та ін. [4].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій та власні дослідження вказують на те, що саме водна ерозія є основною недослідженою частиною в проблемі деградації ґрунтів Бродівського району Львівської області.

Метою статті є детальне вивчення морфогенетичних властивостей сірих лісових, дернового-карбонатних та лучних ґрунтів, а також дослідженні ерозійних процесів у межах досліджуваної території.

Виклад основного матеріалу. Ерозія ґрунту, як фактор його деградації та деградації ґрунтового покриву, як визначник екологічної небезпеки, оцінюється насамперед інтенсивністю змиву та об’ємами матеріалу, що виноситься. Для кількісних оцінок цих показників з метою проектування та впровадження на практиці комплексу протиерозійних та ґрунтозахисних заходів нині використовується велика кількість різних типів моделей ерозії. У таблиці 1 наведено коротку характеристику основних типів цих ерозійних моделей.

Таблиця 1 – Основні типи ерозійних моделей

Тип моделі	**Коротка характеристика**
Цифрова	Використання комп’ютера при обробці більш ширшого діапазону даних.
Стохастична	Виведення штучних послідовних рядів даних, отриманих на основі статистично оброблених величин існуючих простих даних. Максимальна ефективність моделі досягається в поєднанні з (а) чи (в) у випадку, коли необхідні вхідні дані наявні лише для коротких періодів дослідження.
Емпірична	Виявлення статистично видимих зв’язків між усіма ерозійно визначальними наявними даними. В основі моделі покладені дані, отримані при довготривалих комплексних дослідженнях. Виділяють три рівні аналізу: - найнижчий (т. зв. *black-box*) – вивчаються тільки вхідні та вихідні дані; - середній (т. зв. *grey-box*) – окрім вивчення вхідних та вихідних даних, визначаються окремі закономірності в роботі системи; - високий (т. зв. *white-box*) – визначені та вивчені всі особливості роботи досліджуваної системи.

Більшість емпіричних моделей обчислення ерозійних втрат належать до цифрових із середнім рівнем аналізу (*grey-box*). Щоб побудувати таку модель, необхідно визначити найбільш важливі фактори, які впливають на характер та інтенсивність ерозійних процесів, і з допомогою комплексних досліджень, спостережень, вимірів та статистичної обробки математично сформулювати їхній вплив на втрати ґрунту. Саме до такого типу ерозійних моделей відносять модифіковане універсальне рівняння оцінки ерозійних втрат ґрунту (Revised Universal Soil Loss Equation).

$$A=R\,K\,L\,S\,C\,P,$$

де A – втрати ґрунту на одиницю площі (т/га); R – фактор опадів; K – фактор властивостей ґрунту; L – фактор довжини схилів; S – фактор крутизни схилів; C – фактор рослинного покриву; P – фактор протиерозійних заходів.

Найбільш точні результати для рівняння характерні при довжинах схилів до 120 м, їхній крутизні 3-8^{o}, наявності рослинного покриву та певного обробітку ґрунту, для яких відповідні фактори (C та P) вже є. Фактор опадів (R), або зливовий ерозійний індекс, залежить від величини й інтенсивності зливових дощів та зумовлює виніс струменями

водного потоку ґрунтового матеріалу. R-фактор визначається на основі двох параметрів – кінетичної енергії дощу (*E*) та його 30-хвилинної інтенсивності (I_{30}). Зливовий ерозійний індекс R визначають за формулою:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{j} (EL_{30})i}{N},$$

де (EL_{30}) $i = EL_{30}$ для кількості злив *i,* а j= кількість злив протягом N років.

Показник EL_{30} характеризує енергію дощу чи зливи протягом її найбільшої тридцяти хвилинної інтенсивності. Оскільки енергія *(E)* затяжного, проте малоінтенсивного дощу може бути еквівалентна енергії короткочасного, але інтенсивного дощу (зливи), у формулі використовують компонент I_{30}. Визначення фактору властивостей ґрунту (К) ґрунтується на експериментально встановлених співвідношеннях і виражається у вигляді лінійного рівняння:

$$K\text{- } [2{,}1\text{-}10^{-4} (12 - a) M^{1{,}14} + 3{,}25(b - 2) + 2{,}5(c - 3)] \cdot 0{,}01292,$$

де M= (% фракції 0,1-0,002 мм)(% фракції 0,1-0,002 мм + % фракції 2-0,1 мм), *a* – вміст гумусу (%),*b* – код структури , *c* – клас водопроникності.

Відомо, що при збільшенні довжини схилу зростає ерозійна потенційна небезпека, яка виражається фактором *L*. Довжина схилу визначається як горизонтальна відстань від місця, де бере початок водний потік, до місця, де кут нахилу (крутизна схилу) є настільки незначним, що змитий матеріал починає відкладатися або невеликі струмені, об'єднуючись, починають формувати концентровані дощові потоки. L-фактор в RUSLE визначаються за формулою:

$$L = (\lambda/22{,}1)^{m},$$

де 22,1 – унікальна одиниця довжини RUSLE, (м), *m* – показник крутизни схилу, λ – проектована горизонтальна довжина схилу, (м).

C-фактор визначає величину ерозійних втрат ґрунту з певним типом рослинності порівняно з ґрунтом без рослинного покриву. На сьогодні розроблені сучасні методики із застосуванням як підоснови сателітних знімків, з яких за допомогою спектрального аналізу й відповідних формул визначають С-фактор. Фактор *P* відображає вплив на інтенсивність ерозійних процесів усіх протиерозійних заходів, таких як оранка вздовж схилів, терасування, контурний обробіток на схилах різної крутизни, гребенювання, захисні лісосмуги тощо. У випадку, коли ґрунтозахисні заходи не проводяться, *P*-фактор дорівнює 1. Програмний сценарій Erosion RUSLE створює нову GRID-тему ерозійних втрат ґрунту зі стандартною шкалою, значення якої згруповані згідно з чинними нормативами ерозійної деградації ґрунтового покриву.

Таким чином, на основі повної інтеграції географічних інформаційних систем з емпіричною моделлю RUSLE створений програмний модуль для обчислення середньорічних ерозійних втрат ґрунту в межах певної території. Програмний модуль створений на базі програмного середовища ArcView та ArcGis, для яких характерні розширені аналітичні можливості та виконання складних арифметичних та логічних операцій з векторною та растровою інформацією. Результатом створеного програмного модуля Erosion RUSLE є растровий тематичний шар величин втрат ґрунтової маси з поверхні ґрунту. Прикладом просторового моделювання ерозійних процесів засобами створеного програмного модуля Erosion RUSLE є територія Суховільської сільської ради Бродівського району, для якої були зібрані та опрацьовані дані дослідження 2021 року необхідні для створення ерозійних просторових моделей засобами ArcView 3.2. Дані були оформлені належним чином та переведені у векторний формат.

Вихідними даними при оцінюванні інтенсивності ерозії були цифрова модель рельєфу (ЦМР), отримана шляхом інтерполяції гіпсометричних шарів оцифрованої великомасштабної топографічної карти (масштабу 1:10 000. З метою кількісного моделювання поширення площинного змиву з використанням ГІС-технологій було створено електронну карту рельєфу місцевості на територію сільської ради Бродівського району.

Сучасні інформаційні технології дозволяють створювати ЦМР, які є основою для побудови ГІС і за їх допомогою вирішувати ряд наукових та народногосподарських проблем [3]. Можливості ГІС дозволяють інтерпретувати просторову інформацію в найрізноманітніших моделях та способах зображення. Зокрема, розпізнавання форм рельєфу місцевості доречно вести не лише традиційним шляхом – через зображення їх способами ізоліній (горизонталей), а і створенням за горизонталями тріангуляційних моделей рельєфу (TIN – Triangulated Irregular Network).

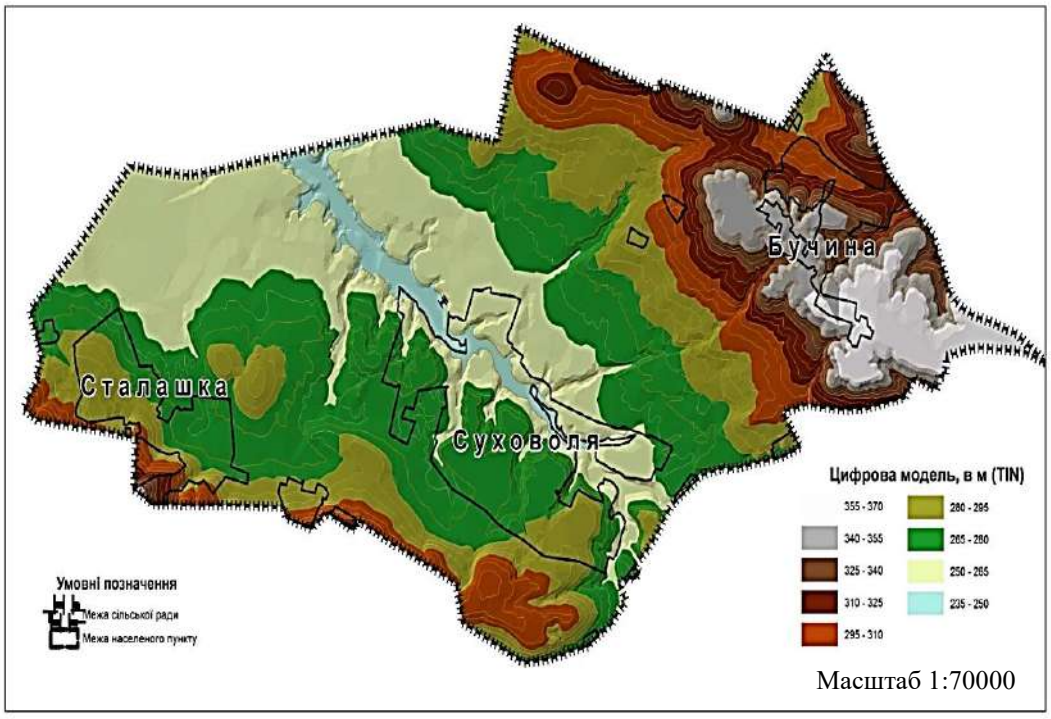


Рис 1. Тріангуляційна модель рельєфу Суховільської сільської ради (отримана шляхом інтерполяції гіпсометричних шарів оцифрованої великомасштабної топографічної карти (масштабу 1:10 000))

Використання даних, отриманих у результаті польових досліджень та лабораторних аналізів НДЛ-50 2020 року дало змогу обчислити фактор властивостей ґрунтів K для ґрунтів досліджуваної території.

Врахувавши фактор опадів (R), фактор властивостей ґрунту (K), довжини (L), крутизни (S) схилів, фактор протиерозійних заходів (P) та рослинного покриву (C) за допомогою модулю Erosion RUSLE отримали картосхеми втрат ґрунтової товщі внаслідок водної ерозії.

Ерозійна модель RUSLE створена для визначення довготривалих середніх ґрунтових втрат внаслідок площинної водної ерозії з певної території з різним рослинним покривом та системою обробітку ґрунту. Універсальність цієї моделі підтверджується великою кількістю праць із застосування USLE та RUSLE для територій різного розміру, з різними природними властивостями та антропогенним навантаженням. Недоліком цієї ерозійної моделі є те, що вона не враховує втрати ґрунту за рахунок інших видів ерозії, при обробітку та виносу його разом з врожаєм. Головною метою використання створеного модуля є можливість застосування його результатів для розробки практичних рекомендацій щодо ефективного ведення сільськогосподарського виробництва.

Аналіз статистичних досліджень окремих авторів дає змогу стверджувати, що найбільш точні результати для рівняння RUSLE характерні при довжинах схилів до 120 м, їхній крутизні 3-8°, наявності рослинного покриву та певного обробітку ґрунту, для яких відповідні фактори (*C* та *P*) вже встановлені.

Для того щоб провести верифікацію даних, отриманих засобами ГІС-модуля в межах сільської ради, необхідні кількісні величини змитого ґрунту, які можна визначити безпосередньо в полі. Відомо, що найбільш точним прямим методом оцінювання об'єму змитого ґрунту є безпосереднє вимірювання об'єму стоку води та наносів зі схилів на спеціально встановлених дослідних ділянках (стокових площадках) або в замкнутих створах схилових водозборів. Проте такий метод потребує проведення багаторічних стаціонарних спостережень, тобто значних матеріальних затрат та часу. Крім того, виникають проблеми екстраполяції отриманих точкових даних на більші території. Можливість використання цього ерозійного модуля для попереднього визначення екологічно небезпечних територій також верифікуються ґрунтовими картографічними матеріалами та даними польових досліджень проведеними в 2013 році [6].

Висновки. У роботі вперше на території сільської ради Бродівського району вивчаються ерозійні процеси в часовому та просторову контексті. Саме ерозійні процеси є основним деградаційним процесом, який спричиняє руйнування ґрунтів у межах території дослідження. Встановлено, що загальні щорічні збитки від ерозії становлять по країні 3,45 млрд грн, а втрати чистого прибутку – 2 млрд грн.

Для захисту ґрунтів Суховільської сільської ради від ерозії застосовано наступні протиерозійні заходи: організаційно-господарські (створення умов для запобігання і припинення ерозійних процесів, раціонального використання земель і підвищення родючості ґрунтів), агромеліоративні протиерозійні заходи (прийоми протиерозійної технології вирощування культур на схилах), лісомеліоративні протиерозійні заходи (водорегулювальна і кольматуюча дія лісної підстилки, вітроломна дія, що сприяє рівномірному розподілу зимових опадів, зниженню величини випаровування з поверхні ґрунту). До групи організаційно-господарських заходів також належить протиерозійне землевпорядкування, яке передбачає ерозійно безпечне нарізування полів сівозмін, доріг, лісосмуг та інших об'єктів. На місцевості сформовано мережу рубежів, що захищають ґрунт від ерозії і водночас служать напрямними лініями його обробітку та впливають на створення штучних водозаборів і можуть значно підсилювати інтенсивність ерозії у випадку неправильного їх розміщення. Тому рубежі на місцевості розташовано таким чином, щоб сприяти максимальному затриманню вологи перед ними й забезпечувати профілактику водної ерозії. Для цього потрібно, щоб всі рубежі на місцевості вписувалися у рельєф, тобто проходили по горизонталях або мали допустимі відхилення від них.

Отримані результати досліджень є вагомим внеском у розвиток теоретичних і практичних основ регіонального ґрунтознавства. Їх пропонується використовувати для: удосконалення діагностики та класифікації ґрунтів; коригування матеріалів ґрунтових обстежень попередніх років; бонітетної та ґрунтово-екологічної оцінки ґрунтів; для розробки заходів збереження та покращення родючості ґрунтів; їхньої охорони від можливого антропогенного впливу.

Список використаних джерел

1. Аверченко В. І. Ґрунтознавство : навч. посіб. / В. І. Аверченко, Н. М. Самойленко. – Х. : Мачулін, 2018. – 118 с.

2. Кирильчук А. А. Дерново-карбонатні грунти (рендзини) Малого Полісся : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.05 / А. А. Кирильчук; Львів. нац. ун-т ім. І. Франка. – Львів, 2001. – 20 с.

3. Оцінка стійкості параметрів рельєфу басейнів малих річок до антропогенного навантаження / І. П. Ковальчук, Ю. М. Андрейчук, Є. А. Іванов, О. І. Микитчин // Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія / відп. ред. В. П. Хільчевський. – К. : ВГЛ "Обрії", 2008. – Т. 14. – С. 221-231.

4. Наконечний Ю. І. Ерозієзнавство: методичні вказівки / Ю. І. Наконечний. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2021. – 35 с.

5. Пшевлоцький М. І. Ґрунти Сокальського пасма і їх агротехногенна трансформація / М. І. Пшевлоцький, В. Г. Гаськевич. – Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка. – 2002. – 180 с.

6. Український археографічний щорічник. – К. : Український письменник, 2013. – Вип. 18, т. 21. – 852 с.

References

1. Averchenko, V.I., Samoilenko, N.M. (2018). *Gruntoznavstvo [Soil science]*. Machulin.

2. Kyrylchuk, A.A. (2001). *Turf-carbonate soils (rendziny) of Maly Polissia [Dernovo-karbonatni hrunty (rendzyny) Maloho Polissia]*. [PhD dissertation, Lviv. National University Named after I. Franko].

3. Kovalchuk, I.P., Andreychuk, Yu.M., Ivanov, E.A., & Mykytchyn, O.I. (2008). Otsinka stiikosti parametriv reliefu baseiniv malykh richok do antropohennoho navantazhennia [Assessment of the stability of relief parameters of small river basins to anthropogenic load]. In *V.P. Khilchevskyi (Ed.), Hidrolohiia, hidrokhimiia, hidroekolohiia – Hydrology, hydrochemistry, hydroecology* (Vol. 14, pp. 221-231). VGL "Obrii".

4. Nakonechnyi, Yu. I. (2021). *Eroziieznavstvo: metodychni vkazivky [Erosion science: methodological guidelines]*. LNU named after Ivan Franko.

5. Pshevlotskyi, M.I., & Gaskevich, V.G. (2002). *Grunty Sokalskoho pasma i yikh ahrotekhnohenna transformatsiia [Soils of the Sokal range and their agrotechnological transformation]*. Publishing Center of LNU named after I. Franko.

6. *Ukrainskyi arkheohrafichnyi shchorichnyk [Ukrainian archeographic yearbook]*. (2013). 18(21). Ukrainian writer.

Отримано 12.06.2022

UDC 502.334.722(477)

***Oleksandra Hulko*[1]**

[1]PhD in Economic Sciences, Senior Lecturer of the Department of Land Cadastre
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: olesya-72@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1476-6149
ResearcherID: G-7764-2014. **Scopus Author ID:** 57224950357

SOIL EROSION DEGRADATION RESEARCH METHODS IN THE BRODIV DISTRICT

The study of the main factors causing erosive degradation of soils, the study of changes in soils under the influence of water erosion, and the modeling of existing and potential water washout of soil horizons determine the relevance of the conducted research. Analysis of morphological features of degraded soils, laboratory analytical studies of their physical and physico-chemical properties, and with the help of GIS tools, modeling of soil washing under the influence of water erosion was carried out. The analysis of studies and publications on the analysis of the main factors that cause erosive degradation of soils, functional analysis and the implementation of modeling of soil washout under the influence of water erosion with the help of GIS tools showed that the issue of changes in background soils under the influence of water erosion and modeling of existing and potential water washout of soil horizons have received little attention in the scientific literature.

The purpose of the article is a detailed study of the properties of gray forest, turf-carbonate and meadow soils, as well as the study of erosion processes within the studied territory.

Cartographic and descriptive materials of the structure of land use in different years within this model area were studied, which made it possible to analyze the impact of approaches in land use on the intensification of water erosion and the degree of washing. Field and laboratory-analytical studies were conducted to study the morphological, physical, physico-chemical properties of the studied soils. A set of GIS maps has been developed. A 3D terrain model was created to determine the long-term average soil loss due to water erosion under a certain vegetation cover and with a certain tillage system, design and implementation of soil protection measures.

For the first time, erosion processes are studied in the territory of the district in a temporal and spatial context. The obtained research results are a significant contribution to the development of the practical foundations of regional soil science. They are proposed to be used for improvement of soil diagnostics and classification; to develop measures to preserve and improve soil fertility; their protection from possible anthropogenic influence.

***Keywords**: water erosion; soil degradation; anti-erosion measures.*

Fig.: 1. Table: 1. References: 9.

Гулько О. Методи дослідження ерозійної деградації ґрунтів у Бродівському районі. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 162-167.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-168-176
УДК 528

Наталія Ярема[1], Андрій Согор[2], Маркіян Согор[3], Мирослава Прохоренко[4], Оксана Серант[5]

[1]кандидат технічних наук, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: nataliia.p.yarema@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5796-2038
Scopus Author ID: 57218923725

[2]кандидат технічних наук, 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

[3]студент 2-го магістерського рівня вищої освіти Інституту геодезії
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: Markiian.Sohor.MHD.2020@ lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0958-2492

[4]кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: myroslava.v.prokhorenko@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0624-0334
Scopus Author ID: 55546862700

[5]кандидат технічних наук, старший викладач кафедри вищої геодезії та астрономії
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: oksana.v.serant@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8062-1135
Scopus Author ID: 57486071600

ВЕБКАРТОГРАФУВАННЯ РОЗВИТКУ КАФЕДРИ ГЕОДЕЗІЇ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

У цій роботі представлено вебкартографування розвитку кафедри геодезії Національного університету «Львівська політехніка». Зібрана вся інформація за 150-літній період існування кафедри геодезії. Створено вебкартографічний додаток із серії карт, який надає користувачу необхідну інформацію про науково-педагогічний та допоміжний склад кафедри, а також зможе відтворити та зберегти історію кафедри для наступних поколінь студентів, аспірантів та науково-педагогічних працівників. Стаття має оглядово-інформаційний характер.

Ключові слова: *вебкартографія; ArcGis; ArcGis-online; вебдодаток; серія карт.*
Рис.: 7. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Кафедра геодезії – найстаріша геодезична кафедра в Україні. У червні цього року їй виповнилося 150 років. Зародження кафедри припало на часи стрімкого індустріального розвитку в Європі. Зростали міста, з'являлись нові поселення в місцях спорудження промислових об'єктів, велось будівництво шляхів сполучення, і все це вимагало висококваліфікованих інженерних кадрів зі знанням геодезії.

Швидкий економічний розвиток суспільства потребував нових технічних знань для розв'язання інженерних задач, а це, своєю чергою, стимулювало розвиток науки. Першу наукову експедицію на кафедрі організував професор Д. Зброжек у 1880 р. Дев'ять років кафедра виконувала роботи зі створення першої нівелірної мережі м. Львів, яка використовувалась для будівництва першої львівської каналізації. У цей час також виконано перші дослідження нівелірної рефракції на кафедрі. Через десятиліття вже під керівництвом професора А. Д. Моторного продовжується вивчення впливу атмосферної рефракції на геодезичні вимірювання і створюється добре відома Львівська школа рефракції, яку майже 50 років очолював професор А. Л. Островський. Під його керівництвом 30 здобувачів та аспірантів захистили дисертації. Загалом на кафедрі організовано близько 80 експедицій [1; 2; 3; 4; 5; 6].

Викладачі кафедри зробили важливий внесок у розвиток та вдосконалення геодезичних приладів. Так, конструкторські ідеї професора Д. Зброжека втілила Швейцарська фірма "G. Coradi" під час виготовлення компенсаційних полярних планіметрів; професор Е. Вільчкевіч сконструював новий тип аеропроєктора й аерофотографічну камеру, а колективи авторів кафедри сконструювали лазерний контуромір та лазерний пристрій контролю прямолінійності [7; 8; 9].

© Ярема Н. П., Согор А. Р., Согор М. Р., Прохоренко М. В., Серант О. В., 2022

Працівники кафедри отримали понад 50 авторських свідоцтв і патентів на винаходи.

На кафедрі завжди звертали особливу увагу на навчальну та методичну роботу. Ще у 1886/87 н.р. професор Д. Зброжек вперше ввів практичні заняття з геодезії і запровадив 20-денну навчальну геодезичну практику в містах Галичини. У 1960-х роках студенти проходили практику в м. Судова Вишня Львівської області, де був створений навчальний геодезичний полігон. А згодом у м. Бережани, де у 1973 р. було завершено будівництво унікального на теренах колишнього Радянського Союзу й України сьогодні навчального геодезичного полігону з автономним містечком і мережею геодезичних пунктів, розміщених на площі близько 150 кв. км [10; 11].

Викладачі кафедри є авторами і співавторами 44 підручників, навчальних посібників та монографій. Крім того, у 1992 р. вийшов російсько-український геодезичний словник, укладання якого ще розпочав професор А. Д. Моторний, а в 2001 р. «Геодезичний енциклопедичний словник», де співавторами є чотири викладачі кафедри [1; 2; 4; 5].

Постановка проблеми. Цікава історія кафедри зумовила потребу впорядкування всієї інформації про науковців, педагогів та інженерів, які працювали на кафедрі геодезії впродовж певного періоду. Наочне представлення найкраще допоможе відтворити історію кафедри геодезії, а саме зібрати та зберегти цікаву та корисну інформацію про кожного працівника. Це надасть можливість абітурієнту, студенту та звичайному користувачу досить швидко та доступно отримати інформацію про науково-педагогічний та допоміжний склад кафедри геодезії. А також дізнатися, де народився та навчався, яке мав вчене звання, що вивчав та досліджував кожен викладач кафедри за 150-літню історію існування кафедри геодезії Національного університету «Львівська політехніка».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час написання статті ми використовували інформацію про науково-педагогічний та допоміжний склад кафедри геодезії Національного університету «Львівська політехніка» за 150-літню історію кафедри, починаючи з 1871 року. Вихідними даними для цієї роботи стала інформація з книги «*Кафедра геодезії. 145 років: Історико-бібліографічний нарис*», з інтернет-ресурсів та з усного опитування працівників кафедри геодезії [1; 4; 5].

На кафедрі також були захищені магістерські роботи на тему «Вебкартографування розвитку кафедри фотограмметрії та геоінформатики Національного університету «Львівська політехніка» та «Вебкартографування випускників Інституту геодезії» (2019). Також були опубліковані роботи [12; 13], у яких відображені результати цих досліджень.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що для більш детального та наочного висвітлення історії кафедри геодезії національного університету «Львівська політехніка» необхідно:

- створити та структуризувати набір усієї доступної інформації з усних джерел від працівників кафедри, із книг та наукових статей, виданих та опублікованих кафедрою геодезії, з інтернет-ресурсів Львівської політехніки, Інституту геодезії та кафедри геодезії;
- укласти інтерактивні вебкарти науково-педагогічного та допоміжного складу працівників кафедри геодезії НУ «Львівська політехніка», які будуть містити інформацію про працівника (ім’я та прізвище, вчене звання/посаду, місце навчання (alma mater), тему дисертації, наукові інтереси, роки праці на кафедрі, інтернет-посилання на фото), локалізовану за місцем його народження, використовуючи картографічну платформу ArcGIS Online;
- створити вебдодаток, який буде містити серію інтерактивних карт.

Метою статті є розробка вебдодатку кафедри геодезії Національного університету «Львівська політехніка» із серією карт, який надасть користувачу необхідну інформацію про науково-педагогічний і допоміжний склад кафедри, а також допоможе відтворити та зберегти її історію.

Виклад основного матеріалу. Після отримання та впорядкування описаної інформації було створено базу даних у табличному редакторі *Microsoft Excel*. Після чого цю інформацію збережено у форматі Книга *Excel 97-2003* (рис. 1).

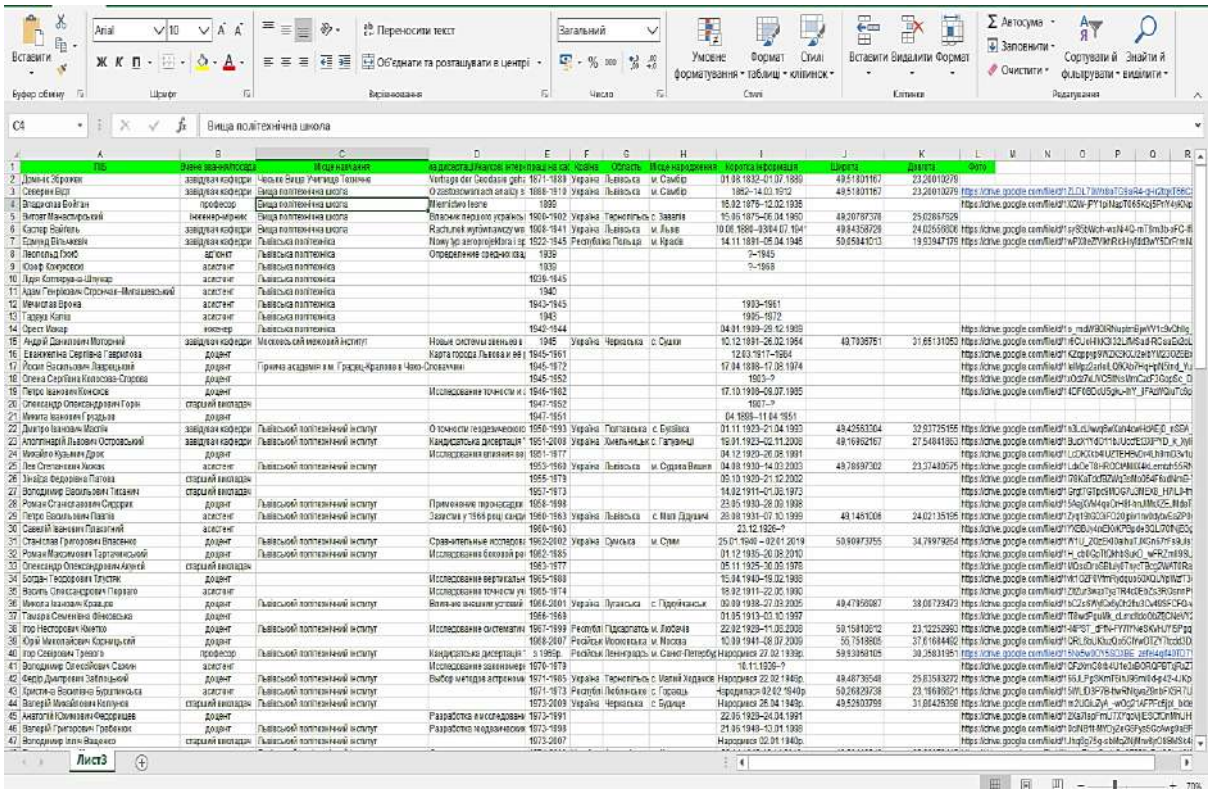


Рис. 1. База науково-педагогічного та допоміжного складу кафедри геодезії

База даних містить таку інформацію про працівника кафедри:

- ім’я та прізвище працівника;
- вчене звання/посада;
- місце навчання (*alma mater*);
- тема дисертації/наукові інтереси;
- роки праці на кафедрі;
- місце народження (країна, область, місто/село);
- дата народження/смерті;
- координати місця народження (широта, довгота);
- посилання на фото працівника.

Для укладання вебкарти науково-педагогічного та допоміжного складу кафедри геодезії використано відповідне програмне забезпечення. Спочатку для створення *shape-файлу* застосовано картографічне середовище *ArcMap*. Після одержання *shape-файлу* в середовищі *ArcMap* виконано експорт та його архівацію. Наступний етап наших досліджень полягав у отриманні інформації стосовно зображення географічного розташування об’єкта спостережень, тобто зображення місць народження працівників кафедри на території України, Європи та Євразії, які можна отримати в картографічному сервісі *ArcGIS Online*. На рис. 2 зображено карту України, яка містить інформацію про кожного працівника кафедри геодезії, локалізовану за місцем їх народження за допомогою географічних координат.

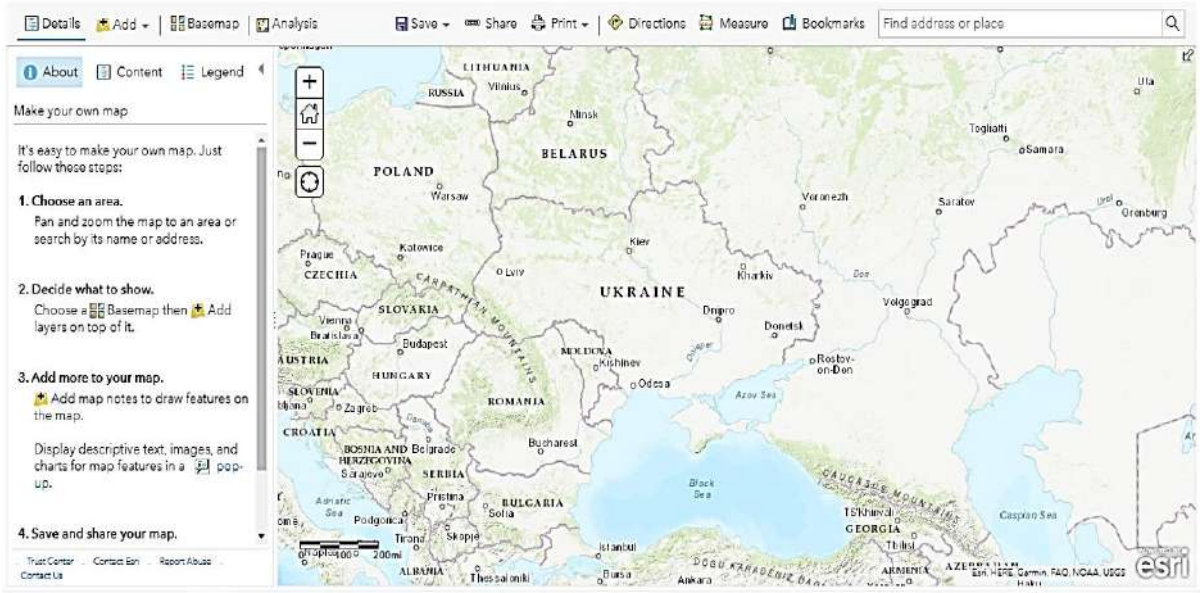


Рис. 2. Зображення території України в ArcGIS Online

Як базову карту запропоновано використати відомий відкритий проєкт *OpenStreetMap*, який спрямований на збір, збереження та поширення загальнодоступних геопросторових даних, створення інструментів для роботи з ними. На рис. 3 показано фрагмент карти працівників кафедри геодезії Львівської політехніки (1871-2021 рр.), отриманий після вибору способу картографічного зображення.

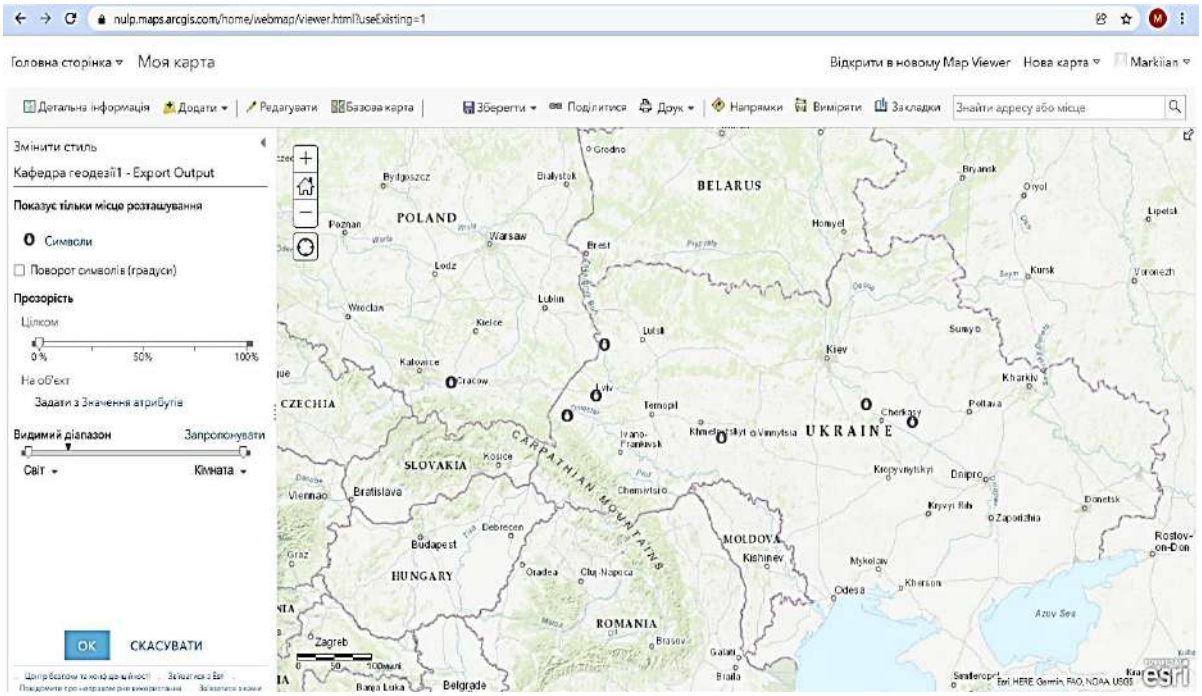


Рис. 3. Фрагмент карти після вибору способу зображення

Після вибору способу картографування на екрані з'явиться інформація про відповідного працівника кафедри геодезії (рис. 4). Активація посилання біля поля *Фото* дає змогу отримати фотографію цього працівника.

Якщо назва полів атрибутивної таблиці не є коректною, її можна змінити використанням функції «*Configure Pop-up*».

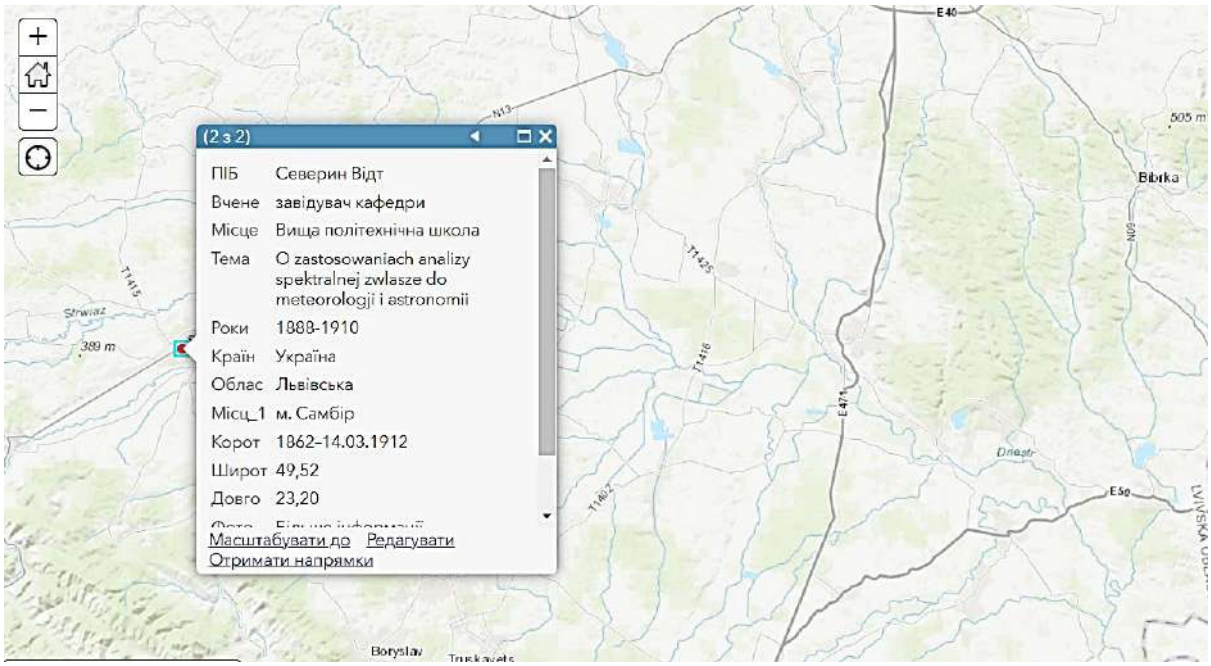


Рис. 4. Карта працівників кафедри геодезії (1871-2021 рр.)

Укладати вебкарти в картографічній платформі *ArcGIS Online* досить зручно, оскільки є можливість застосовувати різноманітні функції стосовно карти, шару чи атрибутивної таблиці. Наприклад, можна застосувати фільтр до атрибутивної таблиці шару «*Карта керівників кафедри геодезії Львівської політехніки (1871-2021 рр.)*», який залишить на карті лише тих працівників, які керували кафедрою геодезії за її 150-літню історію. Для цього обирають у першому полі: «Вчене звання/посада», у другому фільтр «*Is*», а у третьому – «*Завідувач кафедри»* та виконують команду «*Apply Filter*». Таким чином, з'явиться карта, на якій будуть відображені символи та інформація про всіх завідувачів кафедри геодезії (рис. 5).

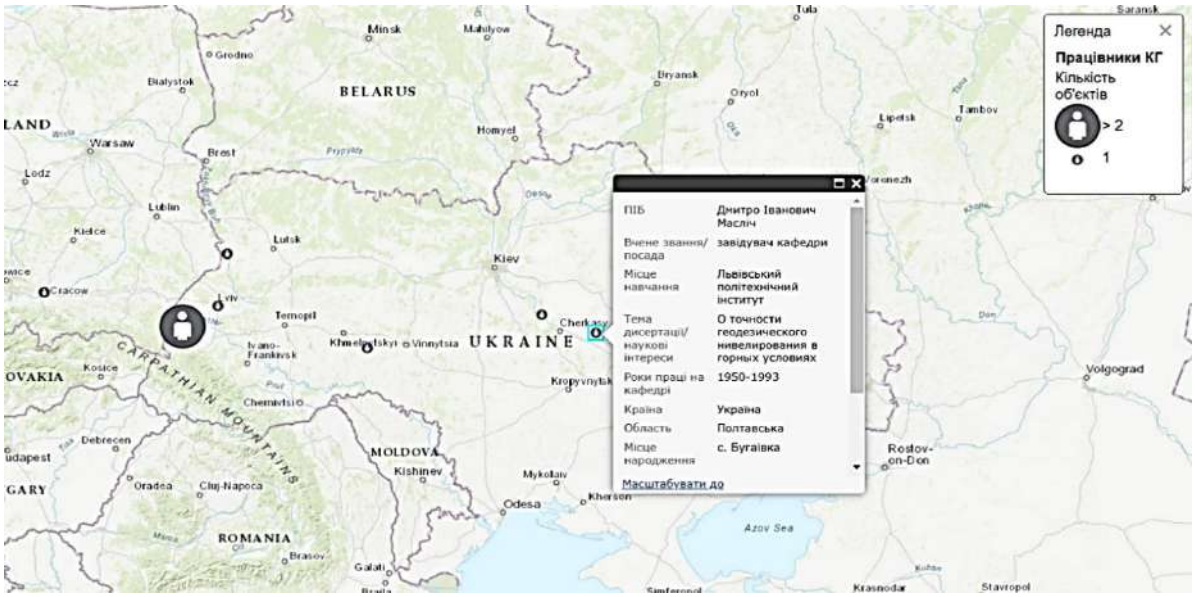


Рис. 5. Карта керівників кафедри геодезії (1871-2021 рр.)

Отже, за допомогою фільтрів у сервісі *ArcGIS Online* можна виділяти на карті лише потрібну інформацію.

Якщо окремим шаром до вихідної карти додати заархівовану базу даних про співробітників кафедри, які працювали в перший рік відновлення незалежності України, то можна отримати «*Карту науково-педагогічного та допоміжного складу кафедри геодезії 1991/92 навчального року*» (рис. 6).

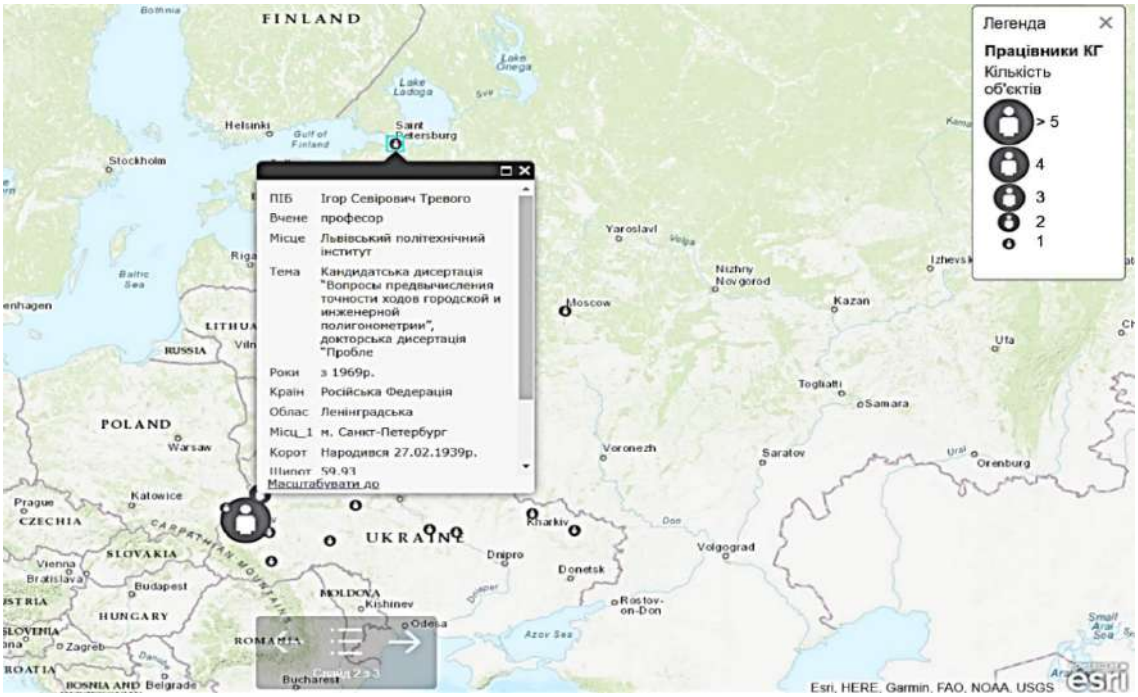


Рис. 6. Карта науково-педагогічного та допоміжного складу кафедри геодезії 1991/92 навчального року

Аналогічним чином була створена «*Карта науково-педагогічного та допоміжного складу кафедри геодезії 2021/22 навчального року*» (рис. 7), на якій відображена найновіша інформація про працівників кафедри геодезії в цьому навчальному році.

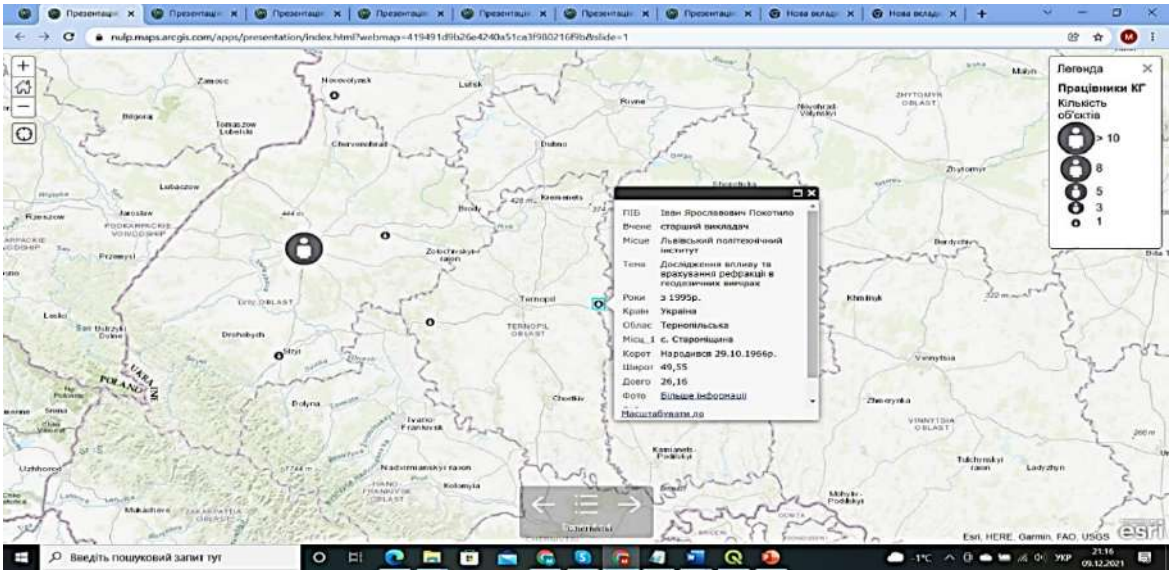


Рис. 7. Карта науково-педагогічного та допоміжного складу кафедри геодезії 2021/22 навчального року

Висновки. Таким чином, у результаті виконаних дій у сервісі *ArcGIS Online*, отримано вебдодаток серії інтерактивних вебкарт під назвою «*Науково-педагогічний та допоміжний склад кафедри геодезії Львівської політехніки*», який містить такі карти:

- карту працівників кафедри геодезії Львівської політехніки (1871-2021 рр.);
- карту керівників кафедри геодезії Львівської політехніки (1871-2021 рр.);
- карту науково-педагогічного та допоміжного складу кафедри геодезії 1991/92 навчального року;
- карту науково-педагогічного та допоміжного складу кафедри геодезії 2021/22 навчального року.

Список використаних джерел

1. Кафедра геодезії. 145 років: Історико-бібліографічний нарис/ О. Мороз, В. Тарнавський, З. Тартачинська, А. Дрбал; Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2016. – 199 с.: іл.
2. Дрбал А. Професор А. Д. Моторний (1891-1964) – один із засновників української геодезичної школи / А. Дрбал, К. Радєй // Геодезія, картографія та аерофотознімання (Львів). – 2011. Вип. 74. – С. 150-160.
3. Дрбал А. Професор Каспер Вайгель (1880-1941) – третій завідувач кафедри геодезії/ А. Дрбал, М. Коцаб // Геодезія, картографія та аерофотознімання (Львів). – 2011. Вип. 74. – С. 161-169.
4. Кафедра геодезії. Історія кафедри. Дата утворення, етапи діяльності, досягнення [Електронний ресурс]. − Режим доступу: http://igdg.lp.edu.ua/?page_id=1330&lang=uk.
5. Кафедра геодезії. Історія кафедри. Хронологія кафедри. [Електронний ресурс]. − Режим доступу: http://igdg.lp.edu.ua/?page_id=2513&lang=uk.
6. Северин Відт. [Електронний ресурс]. − Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Северин_Відт.
7. Finkel L. Historia Uniwersytetu Lwowskiego / L. Finkel, St. Starzynski. – Lwow, 1894. – T. I.
8. Łuszczak G. Nauczyciele i wychowawcy szkół jezuickich we Lwowie 1608-1773 / Łuszczak G. – Wydawnictwo WAM, Kraków, 2010.
9. Politechnika Lwowska, jej stan obecnyi potrzeby. – Lwow: Wydano staraniem grona profesorow, 1932.
10.Łuszczak G. Podręczniki matematyczne dla polskich szkół jezuickich / Łuszczak G., Pawlikowska-Brożek Z. // Wkład jezuitów do nauki i kultury ... / pod red. I. Stasiewicz-Jasiukowej. – Kraków, 2004.
11.Zajaczkowski W.C.K. Szkola Politechniczna we Lwowie / Zajaczkowski W.C.K. – Lwow : Nakladem Szkoly Politechnicznej, 1894.
12.Web-mapping of the development of the Department of Photogrammetry and Geoinformatics of the Lviv Polytechnic National University [Електронний ресурс] / N. Yarema, O. Kubrak, K. Smoliy, R. Vanchura, V. Rachok, O. Popiuk // GeoTerrace-2021 : Міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 4–6 жовтня 2021 р. – Львів, 2021. – DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3015.
13.Web-mapping of graduates of the Institute of Geodesy of the Lviv Polytechnic National University (2019) / N. P. Yarema, M. V. Prokhorenko, A. R. Sohor, O. V. Serant, D. I. Ivantsiv, O. M. Popiuk // GeoTerrace-2021 : Міжнародна науково-технічна конференція молодих професіоналів, 4–6 жовтня 2021 р. – Львів, 2021. – DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3020.

References

1. Moroz, O., Tarnavskyi, V., Tartachynska, Z., Drbal, A. (2016). *Department of Geodesy. 145 years: Historical and bibliographical essay [Kafedra heodezii. 145 rokiv: Istoryko-bibliohrafichnyi narys]*. Vyd-vo Lvivskoi politekhniky.
2. Drbal, A., Radiei, K. (2011). Profesor A. D. Motornyi (1891-1964) – odyn iz zasnovnykiv ukrainskoi heodezychnoi shkoly [Professor A. D. Motorny (1891-1964) - one of the founders of the Ukrainian geodetic school]. *Heodeziia, kartohrafiia ta aerofotoznimannia (Lviv) – Geodesy, cartography and aerial photography (Lviv), 74*, 150-160.
3. Drbal, A., Kotsab, M. (2011). Profesor Kasper Vaihel (1880-1941) – tretii zaviduvach kafedry heodezii [Professor Casper Weigel (1880-1941) - the third head of the department of geodesy]. *Heodeziia, kartohrafiia ta aerofotoznimannia (Lviv) – Geodesy, cartography and aerial photography (Lviv), 74*, 161-169.

4. Kafedra heodezii. Istoriia kafedry. Data utvorennia, etapy diialnosti, dosiahnennia [Department of Geodesy. History of the department. Date of formation, stages of activity, achievements]. http://igdg.lp.edu.ua/?page_id=1330&lang=uk.

5. Kafedra heodezii. Istoriia kafedry. Khronolohiia kafedry [Department of Geodesy. History of the department. Chronology of the department]. http://igdg.lp.edu.ua/?page_id=2513&lang=uk.

6. Severyn Vidt. https://uk.wikipedia.org/wiki/Severyn_Vidt.

7. Finkel, L., Starzynski, St. (1894). *Historia Uniwersytetu Lwowskiego*. (Vol. I).

8. Łuszczak, G. (2010). *Nauczyciele i wychowawcy szkół jezuickich we Lwowie 1608-1773*. Wydawnictwo WAM.

9. *Politechnika Lwowska, jej stan obecnyi potrzeby*. (1932). Wydano staraniem grona profesorow.

10.Łuszczak, G. (2004). Pawlikowska-Brożek Z., Podręczniki matematyczne dla polskich szkół jezuickich. In *I. Stasiewicz-Jasiukowej (ed.), Wkład jezuitów do nauki i kultury...*

11.Zajaczkowski, W.C.K. (1894). *Szkola Politechniczna we Lwowie*. Nakladem Szkoly Politechnicznej.

12.Yarema, N., Kubrak, O., Smoliy, K., Vanchura, R., Rachok, V., Popiuk, O. (2021). Web-mapping of the development of the Department of Photogrammetry and Geoinformatics of the Lviv Polytechnic National University. *GeoTerrace-2021: mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia molodykh profesionaliv – GeoTerrace-2021: International scientific and technical conference of young professionals* https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3015.

13.Yarema, N.P, Prokhorenko, M.V, Sohor, A.R, Serant, O.V, Ivantsiv, D.I, Popiuk, O.M. (2021). Web-mapping of graduates of the Institute of Geodesy of the Lviv Polytechnic National University (2019). *GeoTerrace-2021: mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia molodykh profesionaliv – GeoTerrace-2021: International scientific and technical conference of young professionals*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3020.

Отримано 28.05.2022

UDC 528

Nataliya Yarema[1], Andrii Sohor[2], Markiian Sohor[3], Myroslava Prokhorenko[4], Oksana Serant[5]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: nataliia.p.yarema@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5796-2038
Scopus Author ID: 57218923725

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of 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

[3]Master of the Institute of Geodesy
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: Markiian.Sohor.MHD.2020@ lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0958-2492

[4]PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: myroslava.v.prokhorenko@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0624-0334
Scopus Author ID: 55546862700

[5]Senior Lecturer of the Department of Department of Higher Geodesy and Astronomy
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: oksana.v.serant@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8062-1135
Scopus Author ID: 57486071600

WEB-MAPPING OF THE DEVELOPMENT OF THE DEPARTMENT OF GEODESY OF THE LVIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

This article is review and informative. A web application was created from a series of maps that provide the user with information about the 150-year history of the department of geodesy of Lviv Politechnic National University. With the help of maps, you can get the necessary information about the scientific-pedagogical and auxiliary staff of the department.

In this paper the information was processed and a database was created in the tabular editor Microsoft Excel, which was used to create an interactive web maps of the scientific-pedagogical and auxiliary staff of the Department of Geodesy of Lviv Polytechnic National University.

The methods of cartographic representation are described, in particular, the method of localized icons and the method of cartograms that were used in layout of interactive web maps. The algorithm of stacking and editing is described step by step and in detail interactive web maps and creating a web application with a series of such web maps.

A series of interactive web maps related to the geography of teachers was obtained Department of Geodesy of the Lviv Polytechnic National University, localized by their place of birth. Most of the teachers who once worked or currently work at Department of Geodesy, were born in Lviv region and studied at Lviv Polytechnic Institute or the Lviv Polytechnic National University.

The result of the research was a web application with a series of maps: "Map of the heads of the Department of Geodesy of the Lviv Polytechnic (1871-2021)", "Map of the employees of the Department of Geodesy of the Lviv Polytechnic (1871-2021)", "Map of the scientific, pedagogical and auxiliary staff of the Department of Geodesy 1991/92 academic year", "Map of scientific-pedagogical and auxiliary staff of the Department of Geodesy 2021/22 academic year".

Keywords: *web mapping; ArcGis; ArcGis online; web application; series of maps.*

Fig.: 7. References: 13.

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-177-188
УДК 528:332.3+378

Руслан Беспалько[1], Тарас Гуцул[2], Іван Казімір[3], Іван Смага[4]

[1]доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри землевпорядкування та кадастру
Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича (Чернівці, Україна).
E-mail:r.bespalko@chnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1225-852X
ResearcherID: E-2956-2016

[2]кандидат технічних наук, асистент кафедри землевпорядкування та кадастру
Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича (Чернівці, Україна)
E-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7192-3289
ResearcherID: R-8012-2017

[3]кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри землевпорядкування та кадастру
Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича (Чернівці, Україна)
E-mail: i.kazimir@chnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8362-4676
ResearcherID: E-2972-2016

[4]доктор біологічних наук, професор кафедри землевпорядкування та кадастру
Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича (Чернівці, Україна)
E-mail: i.smaga@chnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9000-3832
ResearcherID: E-3628-2016

ДОСВІД РОЗРОБКИ ОСВІТНЬОЇ ПРОГРАМИ «ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ» (СПЕЦІАЛІЗАЦІЯ «ЗЕМЛЕУСТРІЙ ТА КАДАСТР») У ЧЕРНІВЕЦЬКОМУ НАЦІОНАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА

Запропоновано авторську освітню програму, що забезпечує досягнення додаткових результатів навчання і обґрунтовано заходи щодо їх досягнення. Розглянуто особливості та розкрито сутність кожного з етапів розробки освітньої програми відповідно до методології студентоцентрованого навчання. Освітньо-професійну програму оприлюднено на офіційному сайті, а особливості її складових – у цій публікації з метою обміну досвідом, одержання рекомендацій, зауважень, пропозицій стосовно її змісту, компонентів, специфіки реалізації та оптимізації.

Стаття є оглядово-інформаційною.

Ключові слова: *освітньо-професійна програма; геодезія та землеустрій; бакалавр; здобувачі освіти; навчальний процес; педагогіка вищої школи; стейкхолдери; фахівці.*

Табл.: 2. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Положення законів України «Про освіту» та «Про вищу освіту» з метою успішного надання освітніх послуг регламентують, що вдосконалення освітньо-наукової діяльності повинно відбуватися постійно. Оцінювання освітньої діяльності на предмет забезпечення та вдосконалення якості вищої освіти за освітньою програмою, можливості досягнення заявлених результатів навчання здійснюється добровільно з ініціативи закладу вищої освіти під час акредитації.

Донедавна основний акцент на вдосконалення освітніх програм організації навчального процесу в землеустрої фокусувався на адаптацію сільського господарства до кліматичних змін та ратифіковану Україною Паризьку кліматичну угоду, яка передбачала інтеграцію відповідних заходів до освітнього процесу. За оцінками видання National Geographic, що моделювало карту Землі без льодового покриву, Україна в абсолютних показниках втрачає чи не найбільше в Європі, а Крим стає невеличким островом. Затоплення значних територій суходолу призведе до масових міграцій та потреби інженерного облаштування територій для захисту від несприятливих фізико-географічних явищ та стратегічного планування з урахуванням нових реалій. Проблема глобального потепління безумовно не втратить актуальності, а масштаби можливих наслідків лише зростатимуть.

Нині внаслідок російської військової агресії основні заходи буде спрямовано на трансформацію використання угідь з метою запобігання світовій продовольчій кризі та заходи щодо рекультивації порушених в результаті бойових дій земель. Застосування матеріалів просторового планування повинно сприяти формуванню цілісних та

© Беспалько Р. І., Гуцул Т. В., Казімір І. І., Смага І. С., 2022

комплексних планів щодо відновлення територій громад, відповідно до пріоритетів їх розвитку та наявних можливостей, опираючись на розрахунки та планувальні рішення. Означене повинно знайти якомога швидше відображення у всіх освітніх програмах спеціальності «Геодезія та землеустрій».

Постановка проблеми. Землевпорядну освіту з початку незалежності України, у межах реалізації напряму «Геодезія, картографія та землевпорядкування» з моменту його запровадження в 1992 р. можливо було отримати в численних навчальних закладах різного спрямування. Впродовж тривалого часу здебільшого на дуже низькому рівні було кадрове забезпечення складу кафедр, на багатьох з яких були відсутні доктори наук, професори, при незначній чисельності кандидатів наук, доцентів [1].

У 2016 р. відбувся перехід до однієї спеціальності «Геодезія та землеустрій», розпочалися дискусії щодо скорочення терміну підготовки бакалаврів до трьох років, та з 01.09.2017 р. припинилася підготовка фахівців за освітньо-кваліфікаційним рівнем «спеціаліст» [2].

За даними єдиної державної електронної бази з питань освіти станом на 01.01.2021 р. зареєстровано 45 суб'єктів освітньої діяльності, які здійснювали підготовку здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти. На всіх курсах бакалаврату навчалося 4543 здобувачі (переважно на денній формі навчання – 83 %).

Відсутність стандарту вищої освіти призводила до різних неоднозначностей у процесі підготовки бакалаврів, зокрема: тривалості навчального навантаження, структури та обсягу вивчення дисциплін, термінів та черговості проведення практик та ін.

11 травня 2021 р. МОН України затвердив стандарт вищої освіти за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проаналізовано історичні передумови становлення, розвитку та змісту освітнього процесу, а також кадрового забезпечення у сфері землеустрою [3; 4], проблематику формування майбутнього фахівця за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» в освітньому, науковому та виробничому аспектах [5], вплив профілю закладів вищої освіти на спеціалізацію фахівців та зміст освітніх програм [6].

Стосовно розробки освітніх програм значна увага приділялась методичним аспектам [7], поєднанню різних методологічних підходів (компетентнісний, інтегрований, діяльнісний, ресурсноорієнтований, системний та лідерський) [8] та проблемі оцінювання набутих компетентностей [9]. Зазначається на важливості формування точної відповідності між результатами навчання та видами навчальних елементів, а також критеріями їх оцінювання [10]. Висвітлено специфіку процесу формування майбутнього фахівця під час навчання на наступному, другому (магістерському) рівні із урахуванням комплексного підходу у розробленні освітньої програми одразу за трьома напрямками підготовки із землеустрою та кадастру: технічним, екологічним та управлінським на базі сучасних геоінформаційних систем, геопросторових даних і сучасних технологій [11].

Акцентовано на сучасних тенденціях та завданнях підготовки майбутніх землевпорядників з урахуванням перспектив розвитку топографо-геодезичної та земельно-кадастрової діяльності, їхнього впливу на систему освіти, євроінтеграційні та глобалізаційні процеси [12], зокрема застосування сучасних кейс-методів у викладанні землевпорядних дисциплін [13].

Мета дослідження. Обґрунтування освітньої програми, що забезпечує підготовку високопрофесійних, конкурентоспроможних фахівців, здатних активно діяти в умовах ринкової економіки та соціального партнерства; розвитку наукових пріоритетів та інноваційної складової. Вдосконалення оприлюдненої освітньо-професійної програми в рамках циклічності процесу розроблення та реалізації освітньо-професійних програм відповідно до методології студентоцентрованого навчання.

Матеріали та методи дослідження. Інформаційною основою та ключовими критеріями розробки освітньо-професійної програми безперечно був стандарт вищої освіти за відповідною спеціальністю. Стандарт встановлює сукупність спільних вимог (табл. 1) для всіх освітніх програм у межах певного рівня вищої освіти та спеціальності. Згідно зі ст. 10 Закону України «Про вищу освіту» стандарт встановлює вимоги до освітньої програми. Термінологічний та понятійний апарат використано згідно Глосарію Національного агентства із забезпечення якості вищої освіти. Враховано нормативні та інструктивні матеріали міжнародного, галузевого та державного рівнів, а також сучасні тенденції розвитку сфери геодезії та землеустрою.

Таблиця 1 – Вимоги до освітніх програм за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 193 Геодезія та землеустрій

№	Вимога	Згідно зі стандартом
1	Обсяг кредитів ЄКТС, необхідний для здобуття відповідного ступеня вищої освіти.	240 кредитів ЄКТС
2	Вимоги до рівня освіти осіб, які можуть розпочати навчання за цією програмою, та результатів їх навчання.	На базі ПЗСО; На базі ступеня «фаховий молодший бакалавр», «молодший бакалавр» ЗВО має право визнавати та пере зараховувати не більше ніж 60 кредитів ЄКТС.
3	Перелік обов'язкових компетентностей випускника.	13 позицій спеціальних (фахових) компетентностей.
4	Нормативний зміст підготовки здобувачів вищої освіти, сформульований у термінах результатів навчання.	15 позицій результатів навчання.
5	Форми атестації здобувачів вищої освіти.	Атестація здійснюється у формі публічного захисту кваліфікаційної роботи.
6	Вимоги до створення освітніх програм підготовки за галуззю знань, двома галузями знань або групою спеціальностей (у стандартах рівня молодшого бакалавра), міждисциплінарних освітньо-наукових програм (у стандартах магістра та доктора філософії).	Створення міждисциплінарних програм не передбачено.
7	Вимоги професійних стандартів (за їх наявності).	Професійний стандарт відсутній.

Заклади вищої освіти згідно зі ст. 32 Закону України «Про вищу освіту» в аспекті освітньої діяльності зобов'язані її здійснювати на засадах студентоцентрованого навчання. Методологія побудови студентоцентрованої освітньої програми передбачає дотримання наступної послідовності:

1. Визначення потреби та потенціалу програми.
2. Визначення профілю та ключових компетентностей.
3. Формулювання програмних результатів навчання.
4. Вирішення питання щодо модуляризації освітньої програми.
5. Визначення компетентностей та формулювання результатів навчання.
6. Визначення підходів до викладання, навчання та оцінювання.
7. Перевірка охоплення ключових загальних та предметно-спеціалізованих компетентностей.
8. Розроблення освітньої програми та її структурних одиниць.
9. Перевірка збалансованості та реалістичності програми.
10. Моніторинг та удосконалення програми в процесі її реалізації.

Результати дослідження. Розглянемо детальніше кожен із етапів розробки освітньо-професійної програми «Геодезія та землеустрій» за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти відповідно до методології студентоцентрованого навчання.

1. Визначення потреби та потенціалу програми здійснювалося шляхом запрошення зацікавлених сторін (майбутніх абітурієнтів, науковців, потенційних роботодавців). Надалі вони ставали зовнішніми та внутрішніми стейкхолдерами. До зовнішніх варто ***віднести***

Державну службу України з питань геодезії, картографії та кадастру (Держгеокадастр), яка забезпечує формування державної політики у сфері земельних відносин, *центральні органи виконавчої влади*, що реалізують державну політику у сфері земельних відносин у межах повноважень, встановлених законом, *юридичних та фізичних осіб*, які здійснюють землеустрій (роботодавців, зацікавлених у компетентних фахівцях), *освітні установи* різних типів, видів та рівнів акредитації (установи, які здійснюють професійну підготовку та кадрове забезпечення в землеустрої), *саморегулівні організації у сфері землеустрою* (громадські організації, які об'єднують фізичних осіб, визнаних сертифікованими інженерами-землевпорядниками та здійснюють повноваження з громадського регулювання землеустрою). До внутрішніх стейкхолдерів залучалися *науково-педагогічні працівники*, *навчально-допоміжний* і *адміністративно-управлінський персонал*, *здобувачі* закладу вищої освіти та *фахівці-практики*, які систематично за згодою залучаються до реалізації освітнього процесу. Мета залучення стейкхолдерів полягає в наданні консультацій щодо відповідності освітнього процесу виробничим нормативам та сучасним вимогам ринку праці, проведенні рецензування та експертної оцінки якості освітніх програм.

Мета освітньо-професійної програми узгоджена зі Стратегічним планом розвитку Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича на 2019-2026 рр. та його місією.

2. Визначення профілю та ключових компетентностей. Профіль визначає самобутні (характерні) риси освітньої програми. У ньому зазначається галузь знань (19 Архітектура та будівництво), рівень програми (національна рамка кваліфікацій України – 6 рівень; FQ-EHEA–перший цикл, EQF-LLL – 7 рівень), основний фокус програми (ключові слова: агровиробнича характеристика, бонітування, вимірювання, геодезія, ГІС-засоби, ГІС-технології, ГНСС-метод, землеустрій, моніторинг, облік, оцінка землі, простір, кадастр), ключові результати навчання, особливості навчального середовища, а також основні види навчання, викладання, оцінювання.

Допуском до здійснення професійної діяльності за фахом є наявність підтвердженої документом про вищу освіту кваліфікації (в цьому випадку освітня кваліфікація – бакалавр з геодезії та землеустрою; професійна кваліфікація – фахівець з геодезії та землеустрою). Необхідний рівень освіти досягається завдяки реалізації освітньо-професійної програми і повинен загалом відповідати колу та складності професійних завдань та обов'язків. Визначення потенційних галузей та секторів економіки, де випускними можуть знайти місце роботи доцільно проводити за їх подібністю та групуванням у галузі. Стандартні угрупування наведено в чинному на сьогодні національному класифікаторі видів економічної діяльності ДК 009:2010, а професійні назви робіт у національному класифікаторі професій ДК 003:2010.

Фахівець, підготовлений до професійної діяльності за освітньо-професійною програмою може залучатися до таких видів економічної діяльності: L 68.3 Операції з нерухомим майном за винагороду або на основі контракту; M 70.10 Діяльність головних управлінь (хед-офісів); M 71.12. Діяльність у сфері інжинірингу, геології та геодезії, надання послуг технічного консультування в цих сферах; M 71.20 Технічні випробування та дослідження; M 72.1 Дослідження й експериментальні розробки у сфері природничих і технічних наук; M 72.19 Дослідження та експериментальні розробки у сфері інших природничих і технічних наук; M 74.0 Інша професійна, наукова та технічна діяльність; O 84.11 Державне управління загального характеру.

Фахівець, підготовлений до професійної діяльності може займати первинні посади відповідно до професійних назв робіт за класифікатором професій: адміністратор бази (гео) даних; адміністратор (гео) системи; аерофотогеодезист; аерофотозйомник; асистент астронома; асистент геолога; інженер технічного нагляду (будівництво); інспектор з інве-

нтаризації; лаборант (галузі техніки); лаборант наукового підрозділу (інші сфери (галузі) наукових досліджень; оцінювач; оцінювач (експертна оцінка майна); оцінювач-експерт; редактор карт; редактор карт технічний; технік (природознавчі науки); технік з архітектурного проєктування; технік-аерофотограмметрист; технік-будівельник; технік-будівельник (дорожнє будівництво); технік-геодезист; технік-ґрунтознавець; технік-землевпорядник; технік-картограф; технік-маркшейдер; технік-програміст (геозадачі); технік-топограф; технік-топограф кадастровий; технік-фотограмметрист; фахівець з геосистемного моніторингу навколишнього середовища; фахівець з ДЗЗ та аерокосмічного моніторингу; фотограмметрист; юстирувальник (оптико-електронних, навігаційних геодезичних приладів).

Слід зауважити, що наведений перелік далеко не вичерпний, а професія землевпорядника потребує визначення нових спеціальностей і спеціалізацій [14].

З метою подолання розриву між наданими закладом вищої освіти знаннями та очікуваними роботодавцями уміннями, під час розробки освітніх програм повинен застосовуватися компетентнісний підхід. Особливість компетентностей полягає у їх поступовому набутті під час прослуховування комплексу навчальних дисциплін або модулів на різних етапах програми. Найбільш типові загальні (ЗК – 13 позицій) та спеціальні (СК – 13 позицій) компетентності наведено у стандарті за спеціальністю 193, а їх перелік є однією із вимог до майбутньої освітньо-професійної програми. У розробленій нами освітньо-професійній програмі додано ще 2 загальні (ЗК 14, ЗК 15) та 4 спеціальні (СК 14, СК 15, СК 16, СК 17 компетентності:

– ЗК 14. Прагнення до збереження навколишнього середовища.
– ЗК 15. Здатність спілкуватися з представниками інших професійних груп різного рівня (з експертами різних галузей знань/видів економічної діяльності).
– СК 14. Формувати ефективні механізми забезпечення реалізації принципів землеустрою.
– СК 15. Формувати банки геопросторових даних кадастрів природних ресурсів та аналізувати варіанти оптимального використання господарських угідь в умовах невизначеності (багатоваріантності).
– СК 16. Розробляти проєктні рішення, їх техніко-економічні обґрунтування та організаційного забезпечувати процес їх перенесення в натуру із подальшим авторським наглядом.
– СК 17. Прогнозувати розвиток територій з урахуванням їх функціональних особливостей; територіального формування землекористувань і системних принципів планувальної структури територій.

3. Формулювання програмних результатів навчання. Поняття компетентностей та результатів навчання є основними категоріями студентоцентрованого навчання та ключовими у Європейському просторі вищої освіти. У вітчизняних освітніх документах під результатами навчання мають на увазі – сукупність компетентностей, що виражають знання, розуміння, уміння, цінності, інші особливі якості, які набув студент після завершення освітньої програми, або її окремого компонента. З урахуванням заявлених додаткових загальних та спеціальних компетентностей, а також особливостей змісту предметної частини, окрім визначених стандартом, запропоновано додаткові результати навчання:

– РН 16. Забезпечувати ефективну тривимірну фотореалістичну візуалізацію поточного стану земельних ділянок, аналізу динаміки розвитку процесів на них в історичному контексті та візуалізації варіантів розвитку ситуації в перспективі.
– РН 17. Досліджувати та проєктувати підвищення стійкості агроекосистем на основі створення й удосконалення природоохоронних систем.
– РН 18. Планувати ефективне управління земельними ресурсами з урахуванням регіональних особливостей.

4. Вирішення питання щодо модуляризації освітньої програми. Загальний обсяг чотирирічної бакалаврської програми становить 240 кредитів. З них, – 30% обсягу (73 кредити) навчального навантаження становлять вибіркові компоненти, 55% – професійна та близько 15% загальна підготовка. Слід зауважити, що згідно Закону України «Про вищу освіту» студенти мають право на «вибір навчальних дисциплін у межах передбачених освітньою програмою та робочим навчальним планом, в обсязі, що становить не менше як 25% загальної кількості кредитів ЄКТС, передбачених для даного рівня вищої освіти. Кількість освітніх компонент, що викладаються протягом семестру збалансовано на рівні 7-9, а протягом навчального року в середньому – 15. Найменша кількість кредитів, яка відводиться на опанування навчальної дисципліни – 3. Обсяг кредитів ЄКТС, призначених для відповідних до спеціалізації практик становить 16 кредитів.

5. Визначення компетентностей та формулювання результатів для кожного модуля. Компетентності набуваються особами, що навчаються під час освітнього процесу. Очікувані результати навчання вносяться до силабусів обов'язкових (табл. 2) та вибіркових освітніх компонентів.

Таблиця 2 – Розподіл результатів навчання за освітніми компонентами

Обов'язкові освітні компоненти	Результати навчання																		
	Згідно з освітнім стандартом за спеціальністю 193 – Геодезія та землеустрій															Додаткові			Обсяг (ECTS)
	РН 1	РН 2	РН 3	РН 4	РН 5	РН 6	РН 7	РН 8	РН 9	РН 10	РН 11	РН 12	РН 13	РН 14	РН 15	РН 16	РН 17	РН 18	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Українська мова за проф. спрямуванням	■		■																3
Іноземна мова за проф. спрямуванням	■																		6
Виробнича практика по спеціальності	■											■							3
Актуальні питання історії та культ. України	■																		3
Випускна кваліфікаційна робота	■		■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	
Навчальна геодезична практика 1 курс		■		■			■				■								5
Навчальна геодезична практика 2 курс		■		■			■				■								5
Організація і управління землевп. та геод. вир-вом		■					■			■	■		■						5
Філософія			■																4
Земельне право				■															3
Державний земельний кадастр				■								■				■		■	5
Геодезія				■		■	■	■											12
Навчальна практика по спец. (GPS)				■			■	■			■								3
Виробнича практика				■			■				■								3
Геологія, геоморфологія з основ. грунт.					■														3
Землеробство з основами рослин.					■												■		4
Фізика					■														3
Радіоелектроніка					■														3
Фін.-економ. діяльність у землеустрої					■												■		5
Інвестиційний аналіз					■														5
Територіальне проєктування та районне планування					■		■										■		4
Основи землеустрою та організації території						■													5
Основи землеустрою та кадастру						■						■							3
Землевпорядне проєктування							■				■						■		10
Картографія							■	■	■		■			■		■			4
Інженерна геодезія							■	■											3
Геодезичні роботи в землеустрої							■	■			■								4

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Фотограмметрія і дистанційне зондування								■	■		■	■							6
Супутникова геодезія								■											5
Математична обробка геодезичних вимірів								■			■								4
Інформатика і програмування									■										3
Інформаційні технології в геодезії та землеустрої									■	■									5
Електронні геодезичні прилади GPS-техн.									■	■									4
ГІС і бази даних									■		■	■	■	■		■		■	5
Математичні методи і моделі в землеустрої									■	■				■	■	■			4
Вища математика									■						■				10
Оцінка землі і нерухомого майна												■							4
Вища геодезія														■					4

Формування результатів навчання за блоком вибіркової частини пов’язане із особливостями вибору здобувачами освітнього процесу із запропонованого переліку загальної (ЗПВ) та професійної (ППВ) підготовки:

- ЗПВ 1 – Землевпорядне креслення та комп’ютерна графіка в землеустрої / Інженерна та комп’ютерна графіка у землеустрої / Топографічне креслення та комп’ютерна графіка в геодезії та картографії;
- ЗПВ 2 – Екологобезпечне використання земельних ресурсів / Ландшафтно-екологічні основи формування територій / Загальне землезнавство з основами геоекології;
- ЗПВ 3 – Професійна іноземна мова (Англ. мова / Нім. мова / Франц. мова);
- ЗПВ 4 – Державний нагляд (контроль) у сфері використання та охорони земель / Технічний та авторський нагляд за проєктами землеустрою / Інформаційні технології в менеджменті землеустрою;
- ЗПВ 5 – Освіта та діяльність у сфері землеустрою / Сучасні тенденції розвитку земельних відносин / Сучасні тенденції розвитку землеустрою;
- ППВ 1 – Фізичне виховання (Футбол / Волейбол / Баскетбол / Настільний теніс / Аеробіка / Атлетична гімнастика / Боротьба / Гандбол / Туризм);
- ППВ 2 – Застосування ГНСС-технологій у землеустрої / Автоматизація виробничих процесів у землеустрої / Технологія і автоматизація обробки топографічних даних;
- ППВ 3 – Фізичне виховання / Громадське здоров’я та медицина порятунку / Релігієзнавство / Демократія: від теорії до практики / Загальноуніверситетська дисципліна;
- ППВ 4 – Кадастри природних ресурсів / Галузеві кадастри / Міжнародні аграрні ринкові відносини;
- ППВ 5 – Оцінка і прогнозування якості земель / Технологічні аспекти використання земель / Web-картографування;
- ППВ 6 – Земельні ресурси / Управління земельними фондами / Науково-дослідна робота в геодезії та картографії;
- ППВ 7 – Управління муніципальними землями / Управління землями громад / Географічні аспекти регіонального розвитку;
- ППВ 8 – Метрологія, стандартизація та нормування в землеустрої / Сертифікація спеціалістів у галузі геодезії та землеустрою / Земельні ресурси та розвиток АПК;
- ППВ 9 – Організація землевпорядних робіт / Діяльність у сфері інжинірингу / Загальні закономірності розвитку геосистем та геодинамічних процесів;
- ППВ 10 – Кадастр населених пунктів / Містобудівний кадастр / ГІС-технології в геодезії та землеустрої;

- ППВ 11 – Ефективність використання ресурсів АПК / Геопросторовий аналіз / Геоінформаційне картографування;
- ППВ 12 – Організація кадастрових робіт в населених пунктах / Розвиток земельних відносин / Організація території житлової забудови;
- ППВ 13 – Картографування ґрунтового покриву / Дистанційні обстеження стану ґрунтів / Технологія інженерно-технічного проєктування.

Вибірковий блок професійної підготовки сформовано з урахуванням тематики науково-дослідної роботи кафедри землевпорядкування та кадастру, наукової спеціалізації професорсько-викладацького складу [15].

6. Визначення підходів до викладання, навчання та оцінювання. Організаційні форми: колективне, групове та інтегративне, дистанційне навчання, лекції, семінарські, практичні, лабораторні, індивідуальні заняття, консультації, випускна кваліфікаційна робота, самостійна робота.

Технології навчання: інформаційно-комунікаційні, дистанційні, студентоцентровані, модульні, імітаційні, дискусійні, проблемні, навчання у співробітництві. Проведення занять з окремих дисциплін на базі провідних підприємств у галузі геодезії та землеустрою із залученням професіоналів-практиків.

Оцінювання навчальних досягнень здійснюється за рейтинговою шкалою (прохідні бали 50 … 100) та за інституційною шкалою («відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно»), що використовується для конвертації оцінок мобільних студентів. Оцінювання включає весь комплекс контрольних процедур залежно від компетентнісних характеристик (знання, уміння/навички, комунікація, автономія і відповідальність) результатів навчання, досягнення яких контролюється.

Види контролю:

- за рівнями: контроль на рівні викладача, контроль на рівні завідувача кафедри, контроль на рівні деканату, контроль на рівні ректорату, державна атестація.
- за терміном проведення: оперативний (вхідний, поточний, проміжний, підсумковий) та відтермінований.

Форми контролю: усне та письмове опитування, тестування, презентація наукової, творчої роботи, захист курсових проєктів; звіти з практичних занять та лабораторних робіт; звіти з навчальної та виробничої практики; заліки, екзамени; захист кваліфікаційної роботи бакалавра.

Оцінювання результатів здійснюється відповідно до Положення про контроль і систему оцінювання результатів здобувачів вищої освіти у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича (наказ № 67 від 27.02.2020 р.).

7. Перевірка охоплення ключових загальних та предметно-спеціалізованих компетентностей полягала у побудові матриць відповідності. Матриця відповідності програмних компетентностей компонентам освітньої програми є відображенням структурно-логічних зв’язків між змістом освітньої програми і запланованими програмними компетентностями. Матриця забезпечення програмних результатів навчання відповідними компонентами освітньої програми є відображенням структурно-логічних зв’язків між змістом освітньої програми і запланованими результатами навчання.

8. Розроблення освітньої програми та її структурних одиниць. Опис програми та її структурних одиниць здійснюється на основі профілю. У свою чергу, профіль повинен бути дуже стислим і зрозумілим та вміщувати сім складових, які включають такі підрозділи: 1) загальна інформація; 2) мета програми; 3) характеристика програми; 4) працевлаштування та подальше навчання; 5) стиль викладання, 6) програмні компетентності; 7) перелік програмних результатів навчання.

Зупинимося детальніше лише на деяких пунктах, так як частина складових попередньо нами розглянута. Характеристика програми включає: об'єкти вивчення та діяльності, цілі навчання, теоретичний зміст предметної області, методи, методики та технології, інструменти та обладнання.

Об'єктами вивчення та діяльності є об'єкти землеустрою, топографо-геодезичної та картографічної галузі, державних кадастрів та інших геоінформаційних систем; методи, обладнання, технології збору й аналізу геопросторових даних та відображення їх на картах і планах; спостереження за динамікою змін та їх прогнозування з урахуванням простору та часу.

Цілі навчання: формування у випускників здатності до розв'язання складних спеціалізованих задач та проблем в процесі професійної діяльності або навчання з використанням програмних результатів навчання предметної області геодезії та землеустрою.

Теоретичний зміст предметної області: здійснення комплексу інженерних, кадастрових, топографо-геодезичних, проєктних вишукувань, якісного та кількісного обліку геопросторових об'єктів, з урахуванням особливостей навколишнього середовища, екологічних та економічних заходів спрямованих на раціональну організацію території.

Інструменти та обладнання: геодезичне, навігаційне, аерознімальне обладнання, спеціалізоване геоінформаційне та фотограмметричне програмне забезпечення.

Подальше навчання полягає у здобутті освіти за освітніми програмами другого (магістерського) рівня вищої освіти за наданою та спорідненими спеціальностями на програмах підготовки другого (магістерського) рівня вищої освіти FQ-EHEA, 7 рівня EQL-LLL та 8 рівня Національної рамки кваліфікацій України. Набуття додаткових кваліфікацій в системі освіти дорослих.

9. Перевірка збалансованості та реалістичності програми полягає у відповідності докладених зусиль заявленим компетентностям. Варто також перевірити і раціональність присвоєння кредитів та можливість завершення дисциплін протягом зазначеного у освітній програмі терміну. Вагомий внесок під час такої перевірки одержується в результаті обговорення на Вченій раді структурного підрозділу, перевірці навчальним відділом ЗВО та одержанні рекомендацій науково-методичної комісії ЗВО.

10. Моніторинг та удосконалення програми в процесі реалізації. Програму введено в дію 28 грудня 2021 р. наказом № 633. Програму оприлюднено для ознайомлення на офіційному сайті навчального закладу за вебадресою: ibhb.chnu.edu.ua/dpt/kadastr/navchalna-robota. Рекомендації, зауваження та пропозиції стосовно змісту, компонентів, реалізації та оптимізації пропонованої освітньої програми просимо надсилати на поштову адресу кафедри землевпорядкування та кадастру – kadastr@chnu.cv.ua. Після надходження вони розглядатимуться членами робочої групи та стейкхолдерами на відповідних засіданнях. Моніторинг може проводитися у різний спосіб – анкетування, опитування, інтерв'ювання (у тому числі здобувачів вищої освіти та випускників із метою аналізу їх власного досвіду), моніторинг досягнутих результатів, оцінювання освітньої програми щодо відповідності критеріям забезпечення якості освітніх програм.

Висновки. Розроблено освітньо-професійну програму «Геодезія та землеустрій» за спеціалізацією «Землеустрій та кадастр» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій». Освітньо-професійна програма є нормативним документом, що регламентує нормативні компетентності, кваліфікаційні, організаційні, навчальні та методичні вимоги до підготовки бакалаврів у галузі 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій». Освітньо-професійна програма використовуватиметься під час: ліцензування спеціальності та акредитації освітньої програми; складання навчальних планів; формування робочих програм навчальних дисциплін, силабусів, програм практик, індивідуальних завдань; формуванні індивідуальних навчальних планів студентів; розробленні засобів діагностики якості вищої освіти; атестації бакалаврів за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій»,

визначенні змісту навчання в системі підготовки та підвищення кваліфікації; професійної орієнтації здобувачів фаху; зовнішнього контролю якості підготовки фахівців. Користувачі освітньої програми: здобувачі першого рівня вищої освіти, які навчаються в Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій»; науково-педагогічні працівники, залучені до забезпечення навчального процесу за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти; члени екзаменаційної комісії спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»; приймальна комісія ЗВО; стейкхолдери освітньо-професійної програми спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій». Освітньо-професійна програма поширюється на кафедри університету, які беруть участь у підготовці здобувачів вищої освіти освітнього рівня бакалаврза спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій».

Список використаних джерел

1. Боровий В. Проблеми та пропозиції до якості підготовки фахівців напряму «Геодезія, картографія та землеустрій» / В. Боровий // Землевпорядний вісник. – 2013. – № 7. – С. 7-11.
2. Боровий В. Введена нова спеціальність «Геодезія та землеустрій». Проблеми зміни та пропозиції їх раціонального вирішення / В. Боровий // Землевпорядний вісник. – 2016. – № 4. – С. 17-19.
3. Третяк А. Теоретичні основи землеустрою / А. Третяк. – К. : ІЗУ УААН, 2002. – 152 с.
4. Третяк А. Наукові основи землеустрою / А. Третяк. – К. : ТОВ ЦЗРУ, 2002. – 342 с.
5. Беспалько Р. І. Проблемні моменти підготовки та становлення фахівців за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» / Р. І. Беспалько, Т. В. Гуцул, І. І. Казімір // Технічні науки та технології. – 2021. – № 1(23). – С. 198–207. – doi:10.25140/2411-5363-2021-1(23)-198-207.
6. Беспалько Р. І. Потреба актуалізації вимог щодо професійної підготовки та кадрового забезпечення у землеустрої / Р. І. Беспалько, Т. В. Гуцул, І. І. Казімір // Технічні науки та технології. – 2022. – № 4(26). – С. 147–159. – doi:10.25140/2411-5363-2021-4(26)-147-159.
7. Розроблення освітніх програм: методичні рекомендації / В. М. Захарченко, В. І. Луговий, Ю. М. Рашкевич, Ж. В. Таланова ; за ред. В.Г. Кременя. – К. : ДП «НВЦ «Пріоритети», 2014. – 120 с.
8. Нестуля С. Сучасні методологічні підходи до розробки освітньої програми підготовки магістрів «Педагогіка вищої школи» / С. Нестуля, Н. Кононец // Вища школа. – 2020. – № 9. – С. 25-38.
9. Ашиток Н. Компетентнісний підхід як методологія професійної підготовки фахівців у вищій школі / Н. Ашиток // Людинознавчі студії. Серія «Педагогіка». – 2016. – № 3/35. – С. 4–10.
10. Бондаренко В. Виміри якості вищої освіти: необхідність та сучасні тренди, або проєктування робочих програм навчальних дисциплін / В. Бондаренко, О. Савельєва, А. Семенова // Вища школа. – 2021. – № 1-2(198). – С. 75–96.
11. Даценко Л. Землевпорядна освіта магістерського рівня у світі та Україні: стан та перспективи розвитку / Л. Даценко, С. Тітова, Т. Дудун // Український географічний журнал. – 2020. – № 3(111). – С. 56–63. – doi:10.15407/ugz2020.03.056.
12. Русіна Н. Модель підготовки фахівців галузі геодезії та землеустрою в умовах інформатизації, глобалізації та євроінтеграції / Н. Русіна, В. Люльчик // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2020. – Т. 80, № 6. – С. 176–187. – doi:10.33407/itlt.v80i6.2981.
13. Русіна Н. Нові підходи до освітнього процесу майбутніх фахівців у галузі «Геодезія та землеустрій», що ґрунтуються на ідеях В.О. Сухомлинського / Н. Русіна, О. Петрова, Р. Лагоднюк // Нова педагогічна думка. – 2018. – № 3(95). – С. 200–203.
14. Професія «землевпорядник» на ринку праці: стан та проблеми попиту і пропозиції / А. Третяк та ін. // Землеустрій, кадастр і моніторинг земель. – 2018. – № 1. – С. 94–102.
15. Петраковська О. С. Аналіз домінуючих типів землекористування в Карпатському регіоні / О. С. Петраковська, Р. І. Беспалько, М. В. Штефанюк // Містобудування та територіальне планування. – 2022. – № 79. – С. 313–322. – doi: 10.32347/2076-815x.2022.79.313-322.

References

1. Borovyi, V. (2013). Problemy ta propozytsii do yakosti pidhotovky fakhivtsiv napriamu “Heodeziia, kartohrafiia ta zemleustrii” [Problems and proposals for the quality of training in the field of “Geodesy, Cartography and Land Management”]. *Zemlevporiadnyi visnyk – Land Management Bulletin, 7,* 7–11.

2. Borovyi, V. (2016). Vvedena nova spetsialnist «Heodeziia ta zemleustrii». Problemy zminy ta propozytsiiy ikh ratsionalnoho vyrishennia [A new specialty "Geodesy and Land Management" was introduced. Problems of change and proposals for their rational solution]. *Zemlevporiadnyi visnyk – Land Management Bulletin, 4*, 17–19.

3. Tretyak, A.M. (2002). *Teoretychni osnovy zemleustroiu [Theoretical foundations of land management]*. Institute of Land Management of UAAS.

4. Tretyak, A.M. (2002). *Naukovi osnovy zemleustroiu [Scientific bases of land management]*. Center of Land Reform of Ukraine.

5. Bespalko, R., Kazimir, I., & Hutsul, T., (2021). Problemni moment pidhotovky ta stanovlennia fakhivtsiv za spetsialnistiu 193 "Heodeziia ta zemleustrii" [Problem moments of training and formationof specialists in specialty 193 "Geodesy and Land Management"]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies,* (1(23)), 198–207. doi:10.25140/2411-5363-2021-1(23)-198-207.

6. Bespalko, R., Hutsul, T., & Kazimir, I. (2021). Potreba aktualizatsii vymoh shchodo profesiinoi pidhotovky ta kadrovoho zabezpechennia u zemleustroi [The need gor updating requirements for professional training and personnel support in Land Management]. *Tekhnichninauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies,* (4(26)), 147–159. doi:10.25140/2411-5363-2021-4(26)-147-159.

7. Zakharchenko, V.M., Luhovyi, V.I., & Rashkevych, Yu.M. (2014). *Rozroblennia osvitnikh prohram: metodychni rekomendatsii [Development of educational programs: guidelines]*. Training and Publishing Center «Priorytety».

8. Nestulia, S., & Kononets, N. (2020). Suchasni metodolohichni pidkhody do rozrobky osvitnoi prohramy pidhotovky mahistriv "Pedahohika vyshchoishkoly" [Contemporary Methodological Approachesto the Development of the Educational Program for Master Training "Pedagogicsof Higher Education School"]. *Vyshcha shkola – High School, 9*, 25–38.

9. Ashytok, N. (2016). Kompetentnisnyi pidkhid yak metodolohiia profesiinoi pidhotovky fakhivtsiv u vyshchii shkoli [Competence approach as a methodology of professional training in higher school]. *Liudynoznavchi studii. Seriia "Pedahohika" – Anthropological studies. Pedagogy Series, 3(35),* 4–10.

10. Bondarenko, V., Savelieva, O., & Semenova, A. (2021). Vymiry yakosti vyshchoi osvity: neobkhidnist ta suchasni trendy, abo proiektuvannia robochykh prohram navchalnykh dystsyplin [Measurements of Quality of Higher Education: Need and Current Trends or Designing Work Programs of Curriculars]. *Vyshchashkola – High School, 1-2(198)*, 75–96.

11. Datsenko, L., Titova, S. & Dudun, T. (2020). Zemlevporiadna osvita mahisterskoho rivnia u sviti ta Ukraini: stan ta perspektyvy rozvytku [Land Management education of the master level in the world and in Ukraine: state and prospects of development]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal – Ukrainian Geographical Journal, 3(111)*, 56–63. doi:10.15407/ugz2020.03.056.

12. Rusina, N., & Liulchyk, V. (2020). Model pidhotovky fakhivtsiv haluzi heodezii ta zemleustroiu v umovakh informatyzatsii, hlobalizatsii ta yevrointehratsii [Model for professionals' training in the field of geodesy and land management in conditions of informatization, globalization and European integration]. *Informatsiini tekhnolohii izasoby navchannia – Information technologies and teaching aids, 80(6),* 176–187. doi:10.33407/itlt.v80i6.2981.

13. Rusina, N., Petrova, O., & Lahodniuk, R. (2018). Novi pidkhody do osvitnoho protsesu maibutnikh fakhivtsiv u haluzi "Heodeziia ta zemleustrii", shcho gruntuiutsia na ideiakh V.O. Sukhomlynskoho [New approaches to the educational process of future specialists in the field of "Geodesy and Land Management", based on the ideas of V.O. Sukhomlinsky]. *Nova pedahohichna dumka – New pedagogical thought, 3(95)*, 200–203.

14. Tretiak, A.M., Tretiak, V.M., Dorosh, Y.M. et al. (2018). Profesiia "zemlevporiadnyk" na rynku pratsi: stan ta problem popytu i propozytsii [The profession of Land surveyor in the labor market: the state and problems of supply and demand]. *Zemleustrii, kadastrimonitorynhzemel – Land management, cadastre and land monitoring, 1*, 94–102.

15. Petrakovska, O.S., Bespalko R.I., & Shtefaniuk, M.V. (2022). Analiz dominuiuchykh typiv zemlekorystuvannia v Karpatskomu rehioni [Analysis of dominant types of land use in the Carpathian region]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban planning and spatial planning, 79*, 313–322. doi: 10.32347/2076-815x.2022.79.313-322.

Отримано: 27.05.2022

UDC 528:332.3+378

Ruslan Bespalko[1], Taras Hutsul[2], Ivan Kazimir[3], Ivan Smaga[4]

[1]Doctor Technical Sciences, AssociateProfessor
Chief of the Department of Land Management and Cadastre
Educational and Scientific Institute of Biology, Chemistry and Bioresources
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)
E-mail:r.bespalko@chnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1225-852X
ResearcherID: E-2956-2016

[2]PhD in Technical Science
Assistant of the Department of Land Management and Cadastre
Educational and Scientific Institute of Biology, Chemistry and Bioresources
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)
E-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua.**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7192-3289
ResearcherID: R-8012-2017

[3]PhD in Biological Science, Associate Professor
Associate Professor of the Department of Land Management and Cadastre
Educational and Scientific Institute of Biology, Chemistry and Bioresources
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)
E-mail:i.kazimir@chnu.edu.ua.**ORCID:**https://orcid.org/0000-0001-8362-4676
ResearcherID: E-2972-2016

[4]Doctor of Biological Sciences, Professor
Professor of the Department of Land Management and Cadastre
Educational and Scientific Institute of Biology, Chemistry and Bioresources
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)
E-mail:r.bespalko@chnu.edu.ua.**ORCID:**https://orcid.org/0000-0002-9000-3832
ResearcherID: E-3628-2016

HAVING EXPERIENCE IN DEVELOPING THE EDUCATIONAL PROGRAM “GEODESY AND LAND MANAGEMENT” (SPECIALIZATION “LAND MANAGEMENT AND CADASTRE”) AT THE YURI FEDKOVYCH NATIONAL UNIVERSITY OF CHERNIVTSI

Substantiation of the educational program that provides training of highly competitive professionals who are able to actively operate in a market economy and social partnership; development of scientific priorities and innovation component. Improving the published educational and professional program within the cyclical process of development and implementation of educational and professional programs in accordance with the methodology of student-centered learning.

In the process of development and further implementation of the educational program applied definition, generalization, identification, analysis, synthesis, induction and deduction, idealization, analogy, selective and continuous observations, control measurements, inventory, systematization, expertise, technological research, method of hypotheses, experiment and modeling.

The structure and features of the standard of higher education approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine at the first (bachelor's) level of knowledge 19 – Architecture and Construction, specialty 193 "Geodesy and Land Management" are analyzed. The current level of information and methodological support for the development of educational programs has been clarified. The peculiarities and essence of each of the stages of development of the educational program in accordance with the methodology of student-centered learning are considered.

The author's educational program that ensures the achievement of additional learning outcomes is proposed and measures to achieve them are justified. The spheres of use and potential users of the educational-professional program are presented. The educational and professional program is published on the official website, and the features of its components – in this publication in order to share experiences, receive recommendations, comments, suggestions on its content, components, specifics of implementation and optimization.

The article is review and informative.

Keywords: *educational-professional program; geodesy and land management; bachelor; students; educational process; higher school pedagogy; stakeholders; specialists.*

Table: 2. References: 15.

Беспалько Р., Гуцул Т., Казімір І., Смага І. Досвід розробки освітньої програми «Геодезія та землеустрій» (спеціалізація «землеустрій та кадастр») у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича. *Технічні науки та технології.* 2022. № 2(28). С. 177-188.

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 (співавторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п’яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **40 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: **http://tst.stu.cn.ua/**

Контактна інформація:
Заступник головного редактора: Сапон Сергій Петрович.
Тел. моб.: (097) 38-44-197
E-mail: tst.technical.sj@gmail.com або s.sapon@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

№ 2(28)

Відповідальний за випуск С. П. Сапон
Редактор О. С. Смєлова

Підписано до друку 04.07.2022. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 22,09.
Тираж 100 пр. Замовлення № 08/22.

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.