

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

№ 2, 2021

DOI:10.30857/2786-5371.2021.2

Наукове фахове видання

Періодичність виходу: 6 разів на рік

Дата заснування: грудень 1999 р.

Київ 2021

Засновником видання «Технології та інжиніринг» є

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Науковий фаховий журнал є правонаступником видання «Вісник Київського національного університету технологій та дизайну», який у свою чергу був правонаступником видання «Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности», який видавався з березня 1958 року у Київському технологічному інституті легкої промисловості (СРСР).

№ 2, 2021

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: серія KB №24822–14762 ПР від 19.04.2021р.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 993 від 24.07.2002 р.

Журнал входить до переліку наукових фахових видань України.

Наказ МОН України від 18.12.2018 № 1412 (додаток 10, рішення щодо подовження) – фаховість із технічних наук (категорія Б).

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online

Журнал зареєстровано в Міжнародному центрі періодичних видань (ISSN International Centre, Париж, Франція)

Журнал реферується та індексується у наступних міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

Засновник і видавець:

Київський національний університет технологій та дизайну
Україна, 01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2

Головний редактор:

Панасюк І.В., д.т.н., професор

Заступник

головного редактора:

Злотенко Б. М., д.т.н., професор

**Відповідальний
секретар:**

Кривонос О. О.

Тематична спрямованість журналу «Технології та інжиніринг»: Мехатронні системи. Ресурсозбереження та енергоефективність. Матеріалознавство індустрії моди, технологій виробництва текстилю, одягу та взуття. Хімічні та біофармацевтичні технології

Видання орієнтоване на науковців, викладачів, аспірантів, студентів, а також науково-практичних працівників і фахівців відповідних галузей промисловості.

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2, корп. 1, к. 1-331а

тел./факс: +38 (044) 256-84-27

e-mail: vistnuk@knu.edu.ua; <http://vistnyk.knu.edu.ua/>

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну, протокол № 10 від 26.05.2021 р.

Матеріали друкуються мовою оригіналу. Відповідальність за переклад, достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв, назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей. Передруки та переклади статей дозволяються лише за згодою автора (-ів) та редакції.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

Issue 2, 2021

DOI:10.30857/2786-5371.2021.2

Scientific Specialized Edition

Issued: 6 times a year

Founded: December, 1999

Kyiv 2021

The owner of "Technologies and Engineering" is

KYIV NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGIES AND DESIGN

This Scientific Specialized Journal is the successor of the edition "Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design", which in turn was the legal successor of the edition «Proceedings of Higher educational establishments. Technology of the light industry», which was published by Kiev Technological Institute of Light Industry from March, 1958 (USSR).

№ 2, 2021

The state registration of print media is KB № 24822-14762 ПП, originating date 19.04.2021

License for publishing activity is ДК №993, originating date 24.07.2002

The journal is listed & reregistered in Higher Attestation Commission of Ukraine: № 1412, originating date 18.12.2018. Fields: Technical Science.

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online

The journal is registered in ISSN International Centre, Paris.

The journal is abstracted and indexed by Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

Owner and Publisher:

Kyiv National University of Technologies and Design
Ukraine, 01011, Kyiv, 2, Nemyrovych-Danchenko, Str.

Editor-in- Chief:

Igor V. Panasiuk - Dr., professor

Deputy Editor:

Borys M. Zlotenko - Dr., professor

Executive secretary:

Olena O. Kryvonos

Scientific fields: Mechatronic systems. Energy Efficiency and Resource-saving Technologies. Material science in the textile, clothing and footwear manufacturing industries. Chemical and biopharmaceutical technologies

The journal is aimed at a wide range of researchers, professors, students, and graduate students and to bring the results of scientific research carried out under a variety of intellectual traditions and organizations of procedures to the attention of a specialized readership.

EDITORIAL OFFICE:

01011, Ukraine, Kyiv, 2, Nemyrovych-Danchenko, Str., office 1-331a

Tel./fax: +38 (044) 256-84-27

e-mail: vistnuk@knuutd.edu.ua; <http://vistnyk.knuutd.edu.ua/>

Recommendations from Science Council of Kyiv National University of Technologies and Design, Protocol № 10, originating date 26.05.2021.

Articles are published in the original language. The authors are responsible for the translation, authenticity of facts, quotations, proper names, geographic names, names of enterprises and other information.

The Editorial Office's and author's consent is needed prior to republishing or translating the articles.

**ВІДОМОСТІ ПРО ЧЛЕНІВ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ
наукового фахового журналу
«ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ»
"TECHNOLOGIES AND ENGINEERING"**

Панасюк Ігор Васильович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту інженерії та інформаційних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *головний редактор*.

Злотенко Борис Миколайович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник головного редактора*.

**СЕКЦІЯ: МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ. РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ
ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

Шведчикова Ірина Олексіївна – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*.

Осипенко Володимир Васильович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*.

Білоус Інна Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри теплотехніки та енергозбереження, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Вельченко Ганна Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок і технологічних комплексів, Білоруський національний технічний університет (Мінськ), Білорусь.

Денисюк Сергій Петрович – доктор технічних наук, професор, директор інституту енергозбереження та енергоменеджменту, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

Жуйков Валерій Якович – доктор технічних наук, професор, декан факультету електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

Мілих Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричних машин, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Стаценко Володимир Володимирович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Суходуб Ірина Олегівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплотехніки та енергозбереження, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Хоменко Володимир Григорович – доктор технічних наук, доцент кафедри електрохімічної енергетики та хімії, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Чорний Олексій Петрович – доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту електричної інженерії та інформаційних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна.

Шавьолкін Олександр Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Atef Saleh Almashakbeh, Doctor of Engineering The Department of Electrical Engineering, Tafila Technical University, Aţ Tafilah, Jordan.

Jasim Mohmed, Docent, PhD The Department of Electrical Power Engineering Techniques, Al-Furat Al-Awsat Technical University – Al-Musssaib Technical college, Kufa, Iraq.

**СЕКЦІЯ: МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ІНДУСТРІЇ МОДИ, ТЕХНОЛОГІЇ
ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЮ, ОДЯГУ ТА ВЗУТТЯ**

Березненко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології та конструювання швейних виробів, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*.

Галавська Людмила Євгенівна – доктор технічних наук, доцент, завідувачка кафедри технології та дизайну текстильних матеріалів, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*.

Арабулі Світлана Іванівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології та дизайну текстильних матеріалів, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Гараніна Ольга Олександрівна – доктор технічних наук, завідувачка кафедри конструювання і технології виробів із шкіри, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Касьян Едуард Євгенович – доктор технічних наук, професор кафедри біотехнології, шкіри та хутра, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Кизимчук Олена Павлівна – доктор технічних наук, професор кафедри технології та дизайну текстильних матеріалів, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Очеретна Лариса – PhD, доцент, кафедра оцінки текстилю, Люберецький технічний університет, Чеська республіка.

Славінська Алла Людвигівна – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри технології та конструювання швейних виробів, Хмельницький національний університет, Україна.

Супрун Наталія Петрівна – доктор технічних наук, професор кафедри технології та дизайну текстильних матеріалів, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Хімічева Анна Іванівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та машин, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

СЕКЦІЯ: ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Барсуков В'ячеслав Зіновійович – доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри електрохімічної енергетики та хімії, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*.

Плаван Вікторія Петрівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної екології, технології полімерів та хімічних волокон, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*.

Андрєєва Ольга Адіславівна – доктор технічних наук, професор кафедри біотехнології, шкіри та хутра, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Баула Ольга Петрівна – кандидат хімічних наук, професор, декан факультету хімічних та біофармацевтичних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Бессарабов Володимир Іванович, доктор технічних наук, доцент кафедри промислової фармації, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Будаш Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної екології, технології полімерів та хімічних волокон, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Картель Микола Тимофійович – доктор хімічних наук, професор, академік НАН України.

Кузьмінський Євген Васильович – доктор хімічних наук, професор, професор кафедри екобіотехнології та біоенергетики Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

Левицький Володимир Євстахович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Савченко Богдан Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної екології, технології полімерів та хімічних волокон, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Скорохода Володимир Йосипович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Страшний Владислав Володимирович – доктор фармацевтичних наук, професор, завідувач кафедри промислової фармації, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Jaskula Marian – professor, Faculty of Chemistry, Jagiellonian University, Cracow, Poland.

Valeika Virgilijus – professor, PhD, Department of Physical and Inorganic Chemistry, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania.

ЗМІСТ

МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ. РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

1. **Дешко В. І., Білоус І. Ю., Суходуб І. О., Бойко Т. Ю.**
Енергоспоживання навчальних корпусів університету в умовах карантинних обмежень України 9
2. **Залюбовський М. Г., Скідан В.В.**
Кінетостатичне дослідження шарнірних просторових механізмів галтувальних машин (частина 2: Дослідження механізму машини з двома робочими ємкостями, що з'єднані поступальною кінематичною парою) 20
3. **Ниркова Л. І., Лісовий П. Е., Гончаренко Л. В., Осадчук С. О., Клименко А. В., Борисенко Ю. В., Браточкин О. В.**
Закономірності корозійного розтріскування трубної сталі 10Г2ФБ у модельному ґрунтовому середовищі за катодної поляризації 29
4. **Яценко А. С., Олейнікова І. В.**
Використання оптоволокна як складової загального зовнішнього освітлення для створення максимального рівня енергоефективності 40

ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

5. **Куделко К. О., Рождественська Л. М., Борисенко Ю. В., Міхнюк А. О., Барсуков В. З.**
Формування та характеристика пористого анодованого оксиду алюмінію, синтезованого електрохімічно у присутності окисленого графену 48
6. **Резанова Н. М., Будащ Ю. О., Плавач В. П., Коршун А. В., Пристинський С. В.**
Регулювання стійкості рідких мікроструменів поліпропілену в матриці співполіаміду за рахунок нанодобавок 60

TABLE OF CONTENTS

MECHATRONIC SYSTEMS. RESOURCE SAVING & ENERGY EFFICIENCY

1. **Deshko V. I., Bilous I. Y., Sukhodub I. O., Boyko T. Y.**
 Energy consumption of the university educational buildings in the conditions of quarantine restrictions of Ukraine 9
2. **Zalyubovskiy M. G., Skidan V. V.**
 Kinetostatic investigation of hinged spatial mechanisms of galting machines (part 2: Investigation of mechanism of a machine with two hundred works) 20
3. **Nyrkova L. I., Lisovoy P. E., Goncharenko L. V., Osadchuk S.A., Klimenko A. V., Borisenko Yu. V., Batochkin O. V.**
 Regularities of stress corrosion cracking of 10G2FB pipeline steel in near neutral soil environment at cathodic polarization 29
4. **Yatsenko A. S., Oleinikova I. V.**
 Using optic fiber as part of general ambient lighting to maximize energy efficiency 40

CHEMICAL AND BIOPHARMACEUTICAL TECHNOLOGIES

5. **Kudelko K. O., Rozhdestvenska L. M., Borysenko Yu. V., Mikhnyuk A. O., Barsukov V. Z.**
 Formation and characterization of porous anodized aluminum oxide synthesized electrochemical with graphene oxide 48
6. **Rezanova N. M., Budash Yu. O., Plavan V.P., Korshun A. V., Prystynskiy S. V.**
 Regulation of the stability of liquid microjets of polypropylene in a copolyamide matrix at the expense of nanoadditives 60

УДК 620.9

ДЕШКО В. І., БІЛОУС І. Ю., СУХОДУБ І. О., БОЙКО Т. Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НАВЧАЛЬНИХ КОРПУСІВ УНІВЕРСИТЕТУ В УМОВАХ КАРАНТИННИХ ОБМЕЖЕНЬ УКРАЇНИ

Мета. Проаналізувати особливості енергоспоживання об'єктів закладів освіти на прикладі будівлі навчального корпусу №17 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в умовах карантинних обмежень при реалізації енергоощадних схем опалення.

Методика. Енергетичне динамічне моделювання будівлі навчального корпусу університету, створеної в програмному середовищі DesignBuilder, при звичайному та карантинному режимах роботи.

Результати. Рекомендації щодо споживання енергії будівлею на опалення за опалювальний сезон, погодинних значень споживання енергії на опалення, температури повітря та радіаційної в окремих зонах, що в експлуатації, при реалізації енергоощадних режимів роботи опалення будівлі навчального корпусу університету в період дистанційного навчання при впровадженні карантинних обмежень в Україні.

Наукова новизна. Розвинуто комплексний підхід до поглибленого аналізу енергоспоживання в умовах часткового використання приміщень навчальних корпусів в період карантину. Обґрунтовано, що при загальному зменшенні енергоспоживання будівлі в цілому використання окремих приміщень при частковій експлуатації будівлі вимагає додаткових питомих витрат на потреби опалення.

Практична значимість. Проведено імітаційне динамічне моделювання енергоспоживання будівлі на опалення для різних режимів роботи та зайнятості/використання приміщень навчальних корпусів у період карантину в Україні, результати дослідження дозволять отримати комплекс енергетичних характеристик будівлі в цілому та окремих її приміщень/зон для погодинної зміни внутрішніх умов експлуатації та зовнішніх кліматичних умов. Використання запропонованої схеми роботи опалювальної системи будівлі навчального корпусу дозволяє скоротити енергоспоживання за опалювальний період на 8,5% у порівнянні із енергоспоживанням при звичайному режимі роботи, що є економічно доцільним в умовах часткової зайнятості будівлі під час карантинних обмежень (під час локдауну) та непередбачуваної макроекономічної ситуації на ринку енергоносіїв, яка обумовлює тренд до зростання цін на основні енергоносії.

Ключові слова: карантин; температура повітря; середня радіаційна температура; графік роботи; споживання теплової енергії; опалювальна система; енергоспоживання; навчальні заклади; енергозбереження.

Вступ. Енергозбереження та підвищення рівня енергоефективності наразі є пріоритетними напрямками політичної діяльності України, так як є обов'язковими умовами на шляху євроінтеграції національної енергетичної системи. Особливої ж уваги в сфері енергозбереження заслуговують будівлі, адже понад третина світового енергоспоживання припадає саме на них [1]. При цьому при проведенні оцінки та розробки плану заходів з енергозбереження потрібно враховувати ряд параметрів, які характеризують будівлю, в першу чергу – це її призначення, яке визначає набір умов при яких будівля експлуатується (графік роботи, температура внутрішнього повітря, кількість людей тощо). Цікавими з точки зору експлуатації є заклади освіти, оскільки за нормального режиму роботи вони характеризуються великою кількістю перебування людей в робочі години [2, 3], що в свою чергу в значній мірі впливає на інтегральні характеристики теплонадходження в приміщення та споживання

енергоресурсів в залежності від рівня свідомості потенційних споживачів (чи вимикають світло, закривають до кінця кран, відкривають/закривають вікна тощо) [4, 5].

Однак пандемія COVID-19 на початку 2020 року значно вплинула на енергопотребу громадських, зокрема вищих навчальних, закладів. З початку 2020 року ця хвороба почала стрімко поширюватися по світу. У березні 2020 року Всесвітня Організація Охорони Здоров'я (ВООЗ) оголосила спалах COVID-19 глобальною пандемією. При цьому було вказано, що соціальне дистанціювання і особиста гігієна є основними заходами, які можуть допомогти запобігти поширенню COVID-19. Тому, щоб уникнути скупчення людей, більшість країн ввели часткове або повне закриття навчальних закладів, комерційних і промислових компаній [6]. Це призвело до радикальних змін в енергоспоживанні [7]. В Україні в сфері освіти частина закладів продовжила свою роботу в змішаному режимі навчання, частина ж повністю перейшла на дистанційний режим (залежно від епідеміологічної ситуації області, де знаходиться заклад освіти) з метою запобігання поширенню коронавірусної хвороби (при цьому за потреби частина працівників освіти відвідували свої робочі місця). За таких умов, щоб уникнути надмірного використання енергії та забезпечити нормальне функціонування будівель, постає надзвичайно важливим питання мати графіки раціонального використання енергії на потреби опалення з врахуванням експлуатації приміщень. Тому очевидною є актуальність провести поглиблений аналіз впровадження переривчастих та енергоощадних режимів роботи системи опалення зон будівлі навчальних закладів для умов карантину з метою регулювання споживання енергетичних ресурсів відповідно до Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» [8].

Постановка завдання. Завдання дослідження полягає у:

1. створити динамічну модель будівлі на базі навчального корпусу №17 КПІ ім. Ігоря Сікорського в програмному середовищі DesignBuilder з врахуванням внутрішнього зонування приміщень;
2. провести імітаційне моделювання енергоспоживання будівлі для звичайного режиму роботи при впровадженні переривчастих режимів опалення будівлі в цілому;
3. провести імітаційне моделювання енергоспоживання будівлі в умовах карантину з врахуванням графіків використання приміщень та допустимих рівнів пониження температури в них;
4. аналіз результатів моделювання та надання оцінок щодо можливого рівня енергоспоживання будівлі в період карантинних обмежень.

Опис моделі. Для створення моделі будівлі в програмному середовищі DesignBuilder використано навчальний корпус №17 КПІ ім. Ігоря Сікорського, збудований в 1969 році. Будівля розташована в м. Києві. Геометрично будівля є правильної протяжної прямокутної форми з основна частина фасадів орієнтована на північну (пн) та південну (Пд) сторони світу. Будівля має 5 поверхів, а також опалювальний підвал та неопалювальний технічний поверх. Опалювальний об'єм будівлі – $42371,34 \text{ м}^3$, площа – $12184,75 \text{ м}^2$. Всі вікна будівлі замінені на металопластикові однокамерні склопакети з повітряним заповненням камер, за винятком технічного поверху, де встановлені склоблоки. При цьому частка площі світлопрозорих конструкцій складає 36,73%, 12,02%, 35,44% та 12,02% на північній, східній, південній та західній орієнтації, відповідно. Несучий шар зовнішніх стіни будівлі виконано з керамзитобетону, термічний опір огороження $1 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$. Покриття будівлі – суміщене, рулонне, термічний опір огороження $1,25 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; частина покриття – це покриття 5-го поверху, частина – покриття технічного поверху. Фундамент – бетонні блоки. Фундамент підвалу – бутобетонні блоки. Теплозабезпечення будівлі здійснюється через мережі централізованої системи тепlopостачання. Схема тепlopостачання будівлі здійснюється через індивідуальний тепловий пункт, модель якого дозволяє впровадження переривчастих режимів опалення. Крім того передбачено, що опалювальні прилади, встановлені в приміщеннях –

чавунні радіатори М140 з термостатичними головками, що дозволять проводити регулювання по зонах будівлі. Система вентиляції комбінована: механічна та природня. Значна частина складової забезпечення належного повітрообміну в будівлі забезпечується природною вентиляцією (інфільтрація). Кількість людей, що знаходяться у будівлі в нормальному режимі роботи становить 2763, з яких працівники – 234 особи, студенти – 2529. Кліматичні погодинні дані використанні з погодинного файлу IWEC типового року для умов Києва.

3D-модель будівлі навчального корпусу №17, створена в програмному середовищі DesignBuilder, наведена на рис.1.

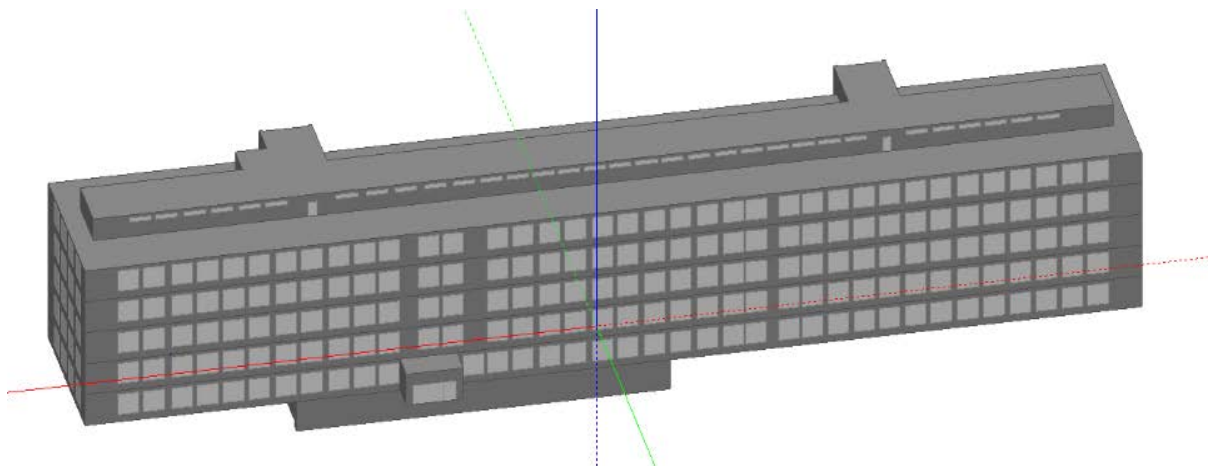


Рис. 1. 3D-модель навчального корпусу №17 КНУ ім. Ігоря Сікорського

Результати моделювання. Розрахунок базового рівня енергоспоживання проведено відповідно до параметрів комфорту за діючими стандартами [8 – 12] та типових кліматичних умов. Енергетична модель навчального корпусу №17 передбачає зонне регулювання рівня опалення та постійний рівень нормативний рівень повітрообміну. Для базового рівня річна енергопотреба на потреби опалення при звичайному режимі роботи навчального закладу склала 679653,95 кВт·год/рік для температурних графіків наведених в табл. 1. Подальші модельні дослідження проводились для температурних графіків характерних для умов карантину, тобто графіки роботи, які відповідають режиму роботи в умовах карантину окремих зон будівлі, які використовуються (табл. 1) та відповідні графіки температурні графіки для приміщень, які не використовуються.

В зонах, які експлуатуються, запропонований наступний температурний графік: 20°C в робочі години (від 07:00 до 18:00), а в неробочі години та вихідні і святкові дні температура приміщень знижується до 17°C. Також це стосується площі загального користування – санвузли, коридори з 1 по 4 поверх. Температура на останньому 5 поверсі та в аудиторіях, що не використовуються, підтримується опалювальною системою на рівні 13°C весь час. Детальний температурний розподіл по окремих зонах при звичному режимі роботи та запропонований температурний розподіл в умовах карантину наведено в таблиці 1.

При підтриманні нормативної температури в робочі години лише в окремих зонах, що використовуються, енергоспоживання на потреби опалення за опалювальний сезон за результатами модельного розрахунку склало 621854,47 кВт·год, що на 8,5% менше, ніж при належному опаленні усієї будівлі при звичайному режимі роботи. Відповідно зменшилося і питоме енергоспоживання. Результати аналізу наведено в таблиці 2.

Таблиця 1

Температурний розподіл по зонах в умовах карантину

Зона	Звичайний режим	Режим карантину
Температура, °С		
Аудиторії	робочий час: 20 неробочий час: 17	1 і 2 поверх окремі зони, що використовуються: робочий час: 20 неробочий час: 17 Решта зон: 13
Коридори	робочий час: 17 неробочий час: 16	(1–4 поверхи) робочий час: 17 неробочий час: 16
Тамбур	Не опалюється	
Санвузли	робочий час: 18 неробочий час: 17	(1–4 поверхи) робочий час: 18 неробочий час: 17
Підвал: коридор	робочий час: 17 неробочий час: 16	робочий час: 17 неробочий час: 16
Підвал: приміщення	робочий час: 20 неробочий час: 17	13
5 поверх	залежно від призначення (див. попередні пункти)	13
Горище	Не опалюється	

Таким чином бачимо, що застосування позонного керування рівнем температури в умовах карантинного режиму роботи дозволяє скоротити енергоспоживання на 8,5%, що є економічно доцільним і обґрунтованим при частковому використанні площ будівлі. Однак, питоме енергоспоживання на одиницю опалювальної до належного рівня площі (об'єму) збільшилося на 39%. Це свідчить про те, що в приміщеннях, в яких підтримується належна температура в робочі години інтенсифікується тепловідтік через внутрішні стіни в сусідні приміщення, де рівень опалення знижений. На рис. 2 наведено погодинні графіки зміни температури повітря в розглянутих репрезентативних приміщеннях та середньорадіаційна температура в них для звичайного режиму роботи (рис. 2, в-г), карантинну (рис. 2, а-б), а також зміни зовнішньої температури та сонячних теплонадходжень на вертикальні поверхні Пн та Пд орієнтації (рис. 2, д).

Таблиця 2

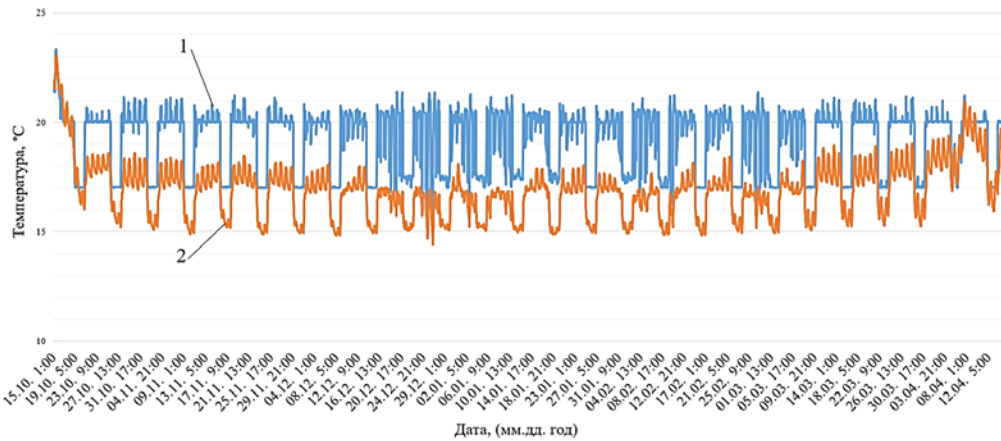
Порівняння споживання теплової енергії для двох режимів роботи

№	Критерій порівняння	Режим карантину	Звичайний режим	Різниця, %
1	Енергоспоживання за опалювальний сезон, кВт·год	621854,47	679653,95	8,5
2	Опалювальна площа будівлі, м ²	12184,75	-	-
3	Опалювальний об'єм будівлі, м ³	42371,34	-	-
4	Загальна площа будівлі, м ²	13095,73	-	-
5	Загальний об'єм будівлі, м ³	44593,56	-	-
6	Площа, приміщень, що використовуються, м ²	3018,81	12184,75	75,22
7	Питоме енергоспоживання, до опалювальної площі, кВт·год /м ²	51,04	55,78	8,50

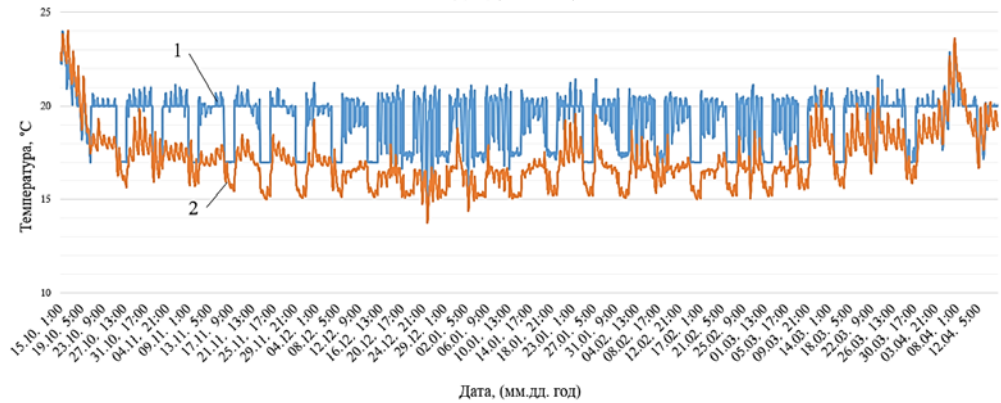
Закінчення табл. 2

№	Критерій порівняння	Режим карантину	Звичайний режим	Різниця, %
8	Об'єм опалювальних приміщень, що використовуються м ³	10509,10	42371,34	75,20
9	Питоме енергоспоживання, до опалювального об'єму, кВт·год /м ³	14,68	16,04	8,50
10	Енергоспоживання приміщень, що використовуються за опалювальний сезон, кВт·год	234070,69	679653,95	65,56
11	Питоме енергоспоживання, до площі приміщень, що використовуються, кВт·год /м ²	77,54	55,78	-39,01
12	Питоме енергоспоживання, до об'єму приміщень, що використовуються, кВт·год /м ³	22,27	16,04	-38,86

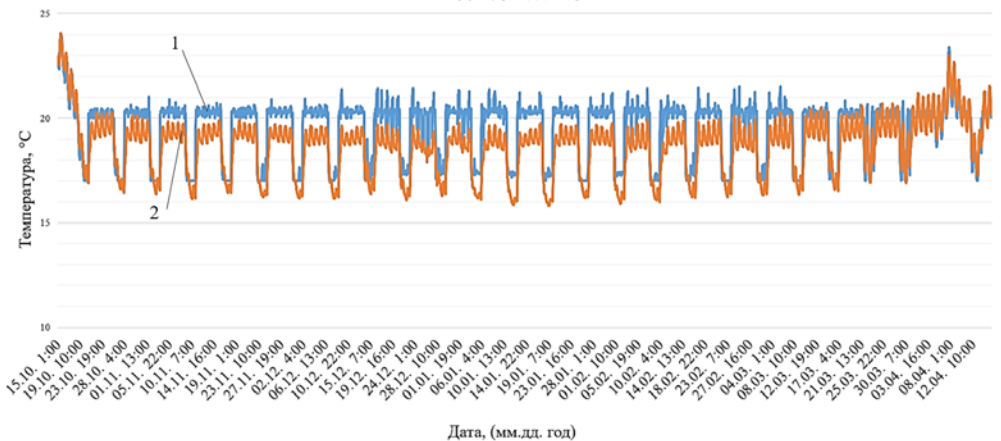
а)

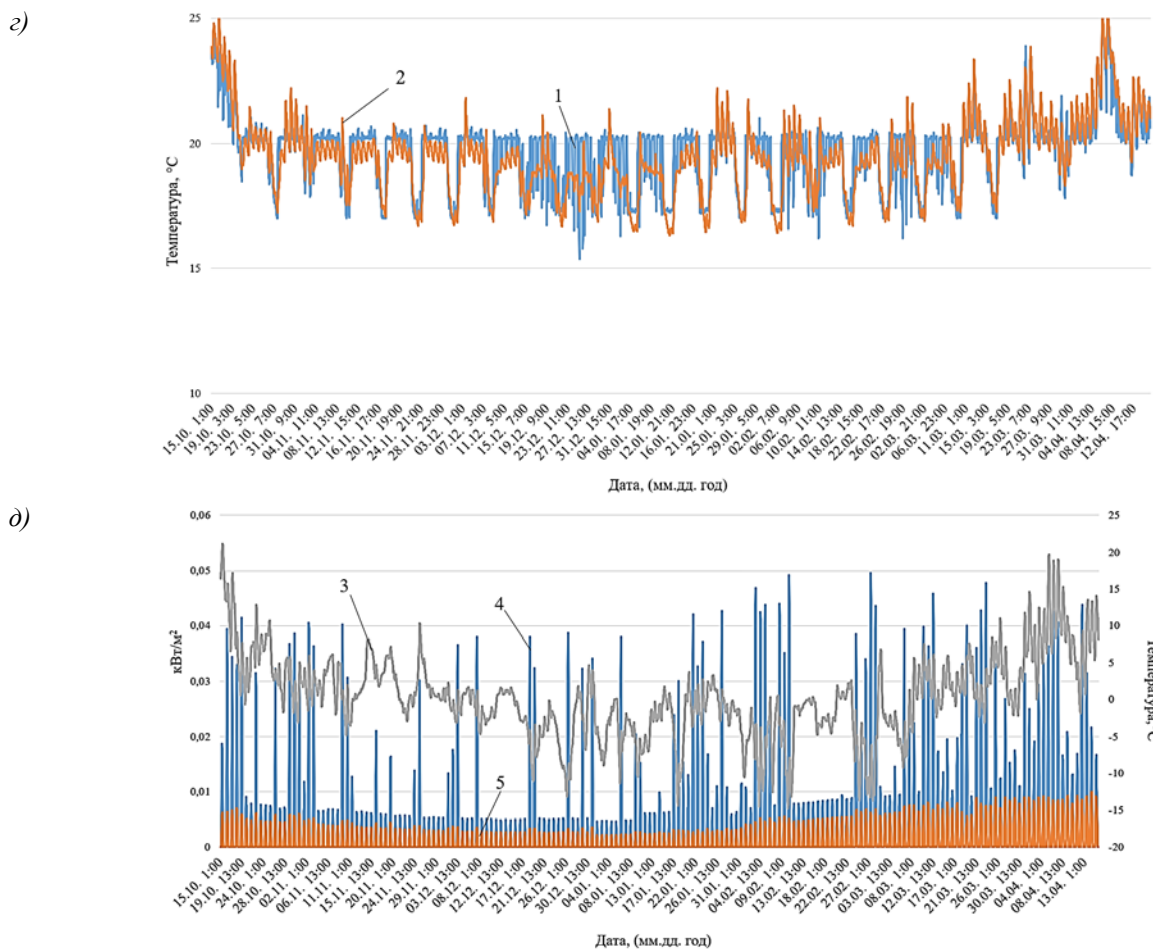


б)



в)





1 – температура повітря в приміщенні, 2 – середньорадіаційна температура, 3 – зовнішня температура, 4 – сонячні теплонадходження, південна орієнтація, 5 – сонячні теплонадходження, північна орієнтація.
Джерело: [13].

Рис. 2. Зміна температури температури повітря та середньорадіаційної протягом опалювального періоду неперезадаєтвних приміщень Пн та Пд орієнтації та зовнішніх кліматичних умов: а) карантин, приміщення Пн орієнтації; б) карантин, південна орієнтація; в) звичайний режим, північна орієнтація; г) звичайний режим, південна орієнтація; д) зовнішня температура та сонячні теплонадходження на вертикальні поверхні за погодним файлом IWEC

З графіків слідує, що параметри комфорту в приміщеннях, які використовується при карантинних обмеженнях погіршується (понижується середньорадіаційна температура), тому що приміщення контактують з холодними зонами, де підтримується стала температура упродовж усього часу ($t_{\text{вн}} = 13^{\circ}\text{C}$), в результаті внутрішні перетоки тепла призводять до зниження середньорадіаційної температури ($t_{\text{сер.рад.}}$). Для приміщень північної орієнтації середньорадіаційна температура найменша (рис. 2,а). Середня різниця між $t_{\text{вн}}$ і $t_{\text{сер.рад}}$ за протягом опалювального року становить біля $2,2^{\circ}\text{C}$. Для приміщення південної орієнтації (рис. 2,б) середньорадіаційна температура підвищується, спостерігається зростання амплітуди коливання внутрішньої температури повітря приміщення за період день-ніч, що пояснюється додатковими теплонадходженнями від сонця на південній стороні на відміну від північної. При цьому різниця між $t_{\text{вн}}$ і $t_{\text{сер.рад}}$ усереднена за опалювальний період становить біля $2,0^{\circ}\text{C}$. Для звичайного режиму роботи у приміщеннях південної орієнтації спостерігається досить близькі значення внутрішньої температури повітря і середньорадіаційної (середня різниця між $t_{\text{вн}}$ і $t_{\text{сер.рад}}$ становить $0,1^{\circ}\text{C}$) у порівнянні з північною орієнтацією, для якої характерне зміщення

кривої середньорадіаційної температури відносно внутрішньої температури повітря вниз (середня різниця між $t_{\text{вн}}$ і $t_{\text{сер.рад}}$ становить $0,9^{\circ}\text{C}$). Таким чином, контактування із холодними зонами призводить до збільшення трансмісійних втрат теплової енергії у сусідні приміщення, зниження середньорадіаційної температури, що призводить до погіршення умов комфорту при однаковій (порівняно з звичайним режимом роботи) температурою повітря в приміщеннях. Тому, при обранні окремих робочих приміщень під час часткового використання будівлі в карантин, доцільно надавати перевагу приміщенням південної орієнтації, що додатково зменшить рівень опалення. Для забезпечення дотримання комфорту в умовах карантинних обмежень при частковій експлуатації приміщень, потребує додатковоо дослідження вплив на споживання енергії збільшення температури повітря в приміщеннях, які експлуатуються, до рівня, який відповідатиме параметру комфорту PMV в діапазоні $-0,5 \dots 0,5$, тобто мінімуму споживання ексергії людським тілом.

На рис. 3 наведено питоме споживання теплової енергії на потреби опалення окремого приміщення, яке експлуатується для умов карантину та звичайного режиму при зміні його розташування з північної сторони на південну. Для порівняння споживання теплової енергії при різній орієнтації, азимут моделі будівлі було повернуто в програмі на 180° і розглянуто одне приміщення для двох випадків. Приміщення, яке розглядається, має площу $60,72 \text{ м}^2$ та два вікна, коефіцієнт засклення $0,256$.

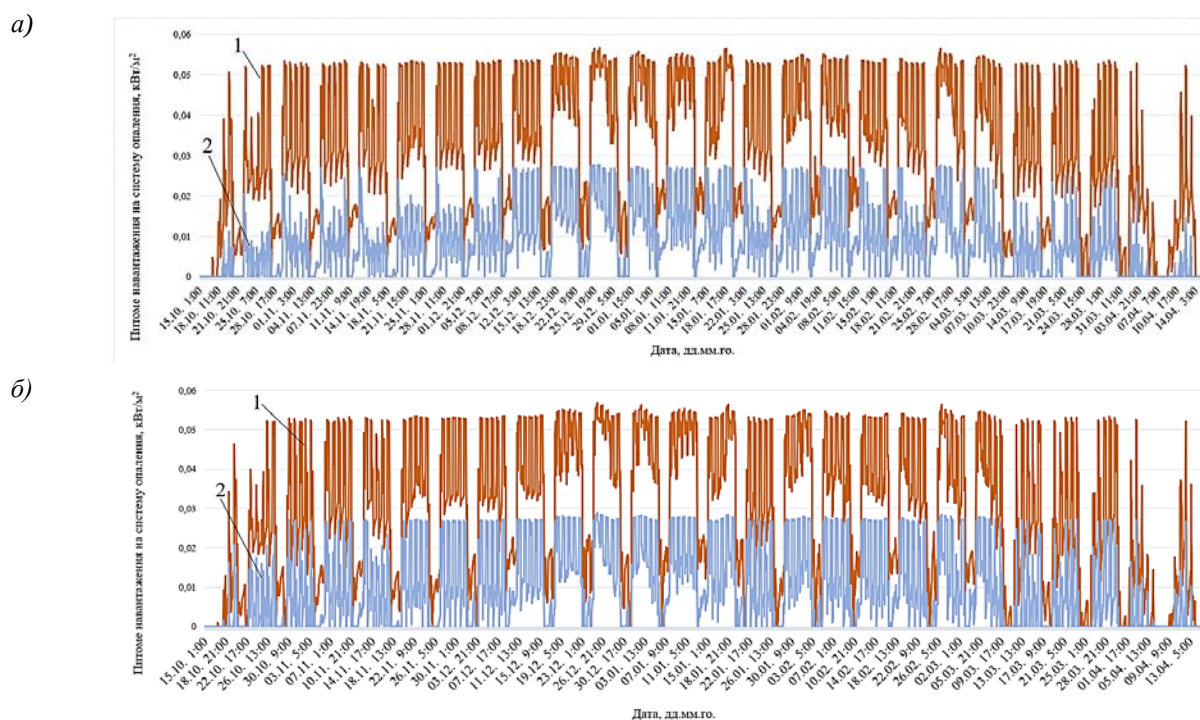
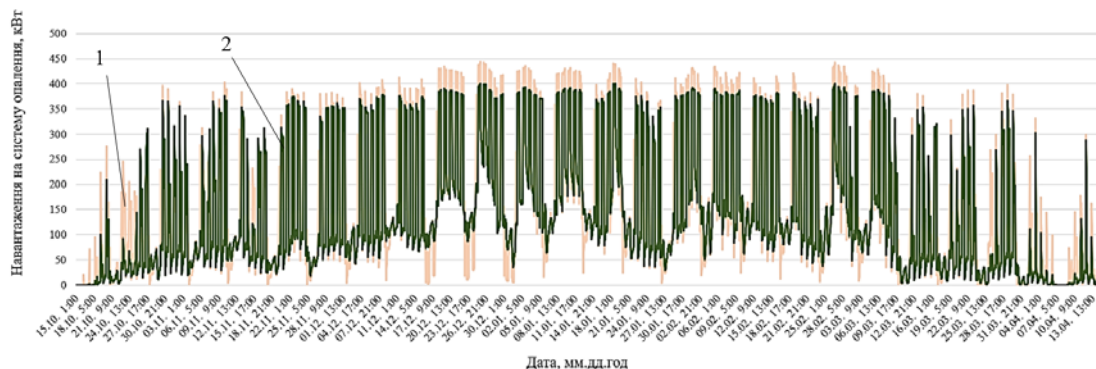


Рис. 3. Погодинне споживання теплової енергії для окремого приміщення, що використовується на Пн (а) та Пд (б) орієнтаціях:
1 – режим карантину, 2 – звичайний режим

З рис. 3 слідує, що потреба в теплозабезпеченні для Пн та Пд орієнтацій в режимі карантину зростає, що підтверджує той факт, що значна кількість теплової енергії втрачається в «холодні зони» і, як наслідок, на потреби опалення приміщень, де знаходяться люди, зростає. Для Пд орієнтації характерним є більш часті відключення/пониження навантаження на систему опалення порівняно з Пн орієнтацією, що зумовлюється інтенсивністю сонячних надходжень.

На рис. 4 наведено погодинне навантаження на систему опалення будівлі в цілому для звичайних умов експлуатації та карантинних обмежень. З рис. слідує, що при впровадженні режимів роботи (опалення приміщень) за умов карантинних обмежень навантаження на систему опалення зменшується.



1 – звичайний режим 2 – режим локдауну

Рис. 4. Порівняння погодинного споживання теплової енергії будівлі від опалювальних приладів в звичайний режим та локдаун

Висновки. В роботі створено динамічну енергетичну модель будівлі на базі навчального корпусу №17 КПІ ім. Ігоря Сікорського. Проведено імітаційне моделювання енергоспоживання навчального корпусу на потреби опалення для звичайних умов експлуатації (у всі приміщення підтримується нормативна температура в період перебування людей) та карантинних умов (лише певна частина приміщень експлуатується, де підтримують нормативне значення температури в період перебування людей).

За результатами моделювання встановлено, що за умови часткового використання будівлі корпусу під час карантину при наявності зонного регулювання загальне енергоспоживання будівлі знижується на 8,5%, однак питоме споживання теплової енергії, для приміщень, що опалюються до нормативного рівня (в тому числі приміщення загального користування) збільшується на 39%. Це обумовлено сусідством приміщень, що використовуються із холодними зонами (призводить до збільшення перетоку через внутрішні огороження), що призводить до зниження середньої радіаційної температури, а отже і параметрів комфорту, особливо для приміщень північної орієнтації.

Визначені погодинні зміни внутрішньої температури повітря та середньорадіаційної температури: найбільша різниця між $t_{\text{вн}}$ і $t_{\text{сер.рад}}$ за опалювальний період становить $2,2^{\circ}\text{C}$, що відповідає приміщенню північної орієнтації, що використовується в карантин, – комфорт в таких приміщеннях погіршується. Отже, при виборі виокремленні окремих робочих зон потрібно надавати перевагу приміщенням південної орієнтації.

Таким чином показано, що впровадження зонного керування навантаженням на систему опалення, особливо в умовах карантину, є доцільним та прийнятним до використання.

Для забезпечення дотримання комфорту в умовах карантинних обмежень при частковій експлуатації приміщень, доречним є дослідити вплив на споживання енергії збільшення температури повітря в приміщеннях, які експлуатуються, до рівня, який відповідатиме параметру комфорту PMV в діапазоні $-0,5 \dots 0,5$.

Пропозиції подальших досліджень стосуються фінансового аналізу та порівняння економічної доцільності використання того чи іншого режиму експлуатації у умовах карантину з урахуванням витрат на модернізацію та змін у системі енергопостачання (зонне регулювання опалення, вентиляції та ін.). Також розглядається можливість пониження температури в місцях загального користування з подальшим аналізом отриманих результатів.

References

1. International Energy Agency. EBC Annex 53: Total energy use in buildings: analysis and evaluation methods. 2013. 132 p. URL: https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_53_Main_Report.pdf.
2. Saraiva, T. S. et al. (2018). Environmental comfort indicators for school buildings in sustainability assessment tools. *Sustainability*, Vol. 10, No. 1849, 11 p.
3. Katić, D., Krstić, H., Marenjak, S. (2021). Energy performance of school buildings by construction periods in Federation of Bosnia and Herzegovina. *Buildings*, Vol. 11, No. 42, 21 p.
4. Zhiyuan, H., Tianzhen, H., Siaw, K. C. (2021). A framework for estimating the energy-saving potential of occupant behaviour improvement. *Applied Energy*, Vol. 287, 13 p.
5. Laarouss, Y. et al. (2019). Occupant behaviour: a major issue for building energy performance. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 609, 7 p.
6. Ivanko, D., Nord, N., Ding, Y. (2021). Heat use profiles in Norwegian educational institutions in conditions of COVID-lockdown. *REHVA Journal*, P. 55–58.
7. Bahmanyar, A., Estebarsari, A., Ernst, D. (2020). The impact of different COVID-19 containment measures on electricity consumption in Europe. *Energy Research & Social Science*, Vol. 68, 4 p.
8. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 р. № 2118-VIII: станом на 01.12.2020 [On energy efficiency of buildings: Law of Ukraine of 22.06.2017 № 2118-VIII: as of 01.12.2020]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text> [in Ukrainian].
9. DSTU-N B V.1.1–27:2010. Будівельна кліматологія; чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Мінрегіонбуд України [Construction climatology; valid from 2011-11-01. View. ofits. Ministry of Regional Development of Ukraine]. Kyiv: Ukrarkhbudininform, 2011. 123 p. [in Ukrainian].
10. ДБН В.2.6–31:2016. Теплова ізоляція будівель; чинний від 2016–10–08, на заміну ДБН В.2.6–31:2006. Вид. офіц. Мінбуд України [Thermal insulation of buildings; effective from 2016–10–08, to replace ДБН В.2.6–31: 2006. View. ofits. Ministry of Construction of Ukraine]. Kyiv: Ukrarkhbudininform, 2016. 33 p. [in Ukrainian].
11. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання; чинний від 2014–01–01. Вид. офіц.

Література

1. International Energy Agency. EBC Annex 53: Total energy use in buildings: analysis and evaluation methods. 2013. 132 p. URL: https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_53_Main_Report.pdf.
2. Saraiva, T. S. et al. Environmental comfort indicators for school buildings in sustainability assessment tools. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, No. 1849. 11 p.
3. Katić D., Krstić H., Marenjak S. Energy performance of school buildings by construction periods in Federation of Bosnia and Herzegovina. *Buildings*. 2021. Vol. 11, No. 42. 21 p.
4. Zhiyuan H., Tianzhen H., Siaw K. C. A framework for estimating the energy-saving potential of occupant behaviour improvement. *Applied Energy*. 2021. Vol. 287. 13 p.
5. Laarouss Y. et al. Occupant behaviour: a major issue for building energy performance. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 609. 7 p.
6. Ivanko D., Nord N., Ding Y. Heat use profiles in Norwegian educational institutions in conditions of COVID-lockdown. *REHVA Journal*. 2021. P. 55–58.
7. Bahmanyar A., Estebarsari A., Ernst D. The impact of different COVID-19 containment measures on electricity consumption in Europe. *Energy Research & Social Science*. 2020. Vol. 68. 4 p.
8. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 р. № 2118-VIII: станом на 01.12.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>.
9. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010. Будівельна кліматологія; чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Мінрегіонбуд України. К.: Укрархбудінформ, 2011. 123 с.
10. ДБН В.2.6–31:2016. Теплова ізоляція будівель; чинний від 2016–10–08, на заміну ДБН В.2.6–31:2006. Вид. офіц. Мінбуд України. К.: Укрархбудінформ, 2016. 33 с.
11. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання; чинний від

Minbud Ukrainy [Heating, ventilation and air conditioning; valid from 2014-01-01. View. ofits. Ministry of Construction of Ukraine]. Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2013. 149 p. [in Ukrainian].

12. DSTU B A.2.2-12:2015. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvittleni ta hariachomu vodopostachanni; chynnyi vid 2016-01-01. Vyd. ofits. Minrehionbud Ukrainy [Energy efficiency of buildings. Method of calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply; valid from 2016-01-01. View. ofits. Ministry of Regional Development of Ukraine]. Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2015. 145 p. [in Ukrainian].

13. EnergyPlus. URL: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR.

2014–01–01. Вид. офіц. Мінбуд України. К.: Укрархбудінформ, 2013. 149 с.

12. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні; чинний від 2016-01-01. Вид. офіц. Мінрегіонбуд України. К.: Укрархбудінформ, 2015. 145 с.

13. EnergyPlus. URL: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR.

DESHKO VALERII

D. Sc. (Tech), Professor
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
<https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>
Scopus Author ID: 6506189670
ResearcherID: J-6517-2017
E-mail: te@kpi.ua

BILOUS INNA

PhD (Tech.), Associate Professor
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
<http://orcid.org/0000-0002-6640-103x>
Scopus Author ID: 57194104035
ResearcherID: J-7070-2017
E-mail: biloys_inna@ukr.net

SUKHODUB IRYNA

PhD (Tech.), Associate Professor
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
<http://orcid.org/0000-0002-5895-1306>
Scopus Author ID: 57140834000
ResearcherID: I-9788-2017
E-mail: ira_krot@ukr.net

BOIKO TETYANA

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
<https://orcid.org/0000-0002-8722-6103>
E-mail: tetyana.boiko@gmail.com

ДЕШКО В. И., БИЛОУС И. Ю., СУХОДУБ И. О., БОЙКО Т. Ю.

Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского"

**ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ УЧЕБНЫХ КОРПУСОВ УНИВЕРСИТЕТА В УСЛОВИЯХ
КАРАНТИННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ УКРАИНЫ**

Цель. Проанализировать особенности энергопотребления здания учебного корпуса №17 Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» в условиях карантинных ограничений при реализации энергосберегающих схем отопления.

Методика. Энергетическое динамическое моделирование здания учебного корпуса университета, созданного в программной среде DesignBuilder при обычном и карантинном режимах работы.

Результаты. Рекомендации по реализации энергосберегающих режимов работы отопления здания учебного корпуса университета в период дистанционного обучения при внедрении карантинных ограничений в Украине.

Научная новизна. Развита комплексный подход к углубленному анализу энергопотребления в условиях частичного использования помещений учебных корпусов в период карантина. Обосновано,

что использование помещений при частичной эксплуатации здания требует дополнительных удельных затрат на отопительные нужды.

Практическая значимость. Проведено имитационное динамическое моделирование энергопотребления здания на отопление для различных режимов работы и занятости/использования помещений учебных корпусов в период карантина в Украине, результаты исследования позволят получить комплекс энергетических характеристик здания в целом и отдельных его помещений/зон для почасового изменения внутренних условий эксплуатации и внешних климатических условий. Использование предложенной схемы работы отопительной системы здания учебного корпуса позволяет сократить энергопотребление за отопительный период на 8,5% по сравнению с энергопотреблением при обычном режиме работы, что экономически целесообразно в условиях частичной занятости здания во время карантинных ограничений (во время локдауна) и непредсказуемой макроэкономической ситуации на рынке энергоносителей, обуславливающая тренд к росту цен на основные энергоносители.

Ключевые слова: карантин; температура воздуха; средняя радиационная температура; график работы; потребление тепловой энергии; отопительная система; энергопотребление; учебные заведения; энергосбережение.

DESHKO V. I., BILOUS I. Y., SUKHODUB I. O., BOYKO T. Y.

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ENERGY CONSUMPTION OF THE UNIVERSITY EDUCATIONAL BUILDINGS IN THE CONDITIONS OF QUARANTINE RESTRICTIONS OF UKRAINE

Target. To analyze the features of energy consumption of the building of the educational building No. 17 of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" in the conditions of quarantine restrictions in the implementation of energy-saving heating schemes.

Methodology. Dynamic energetic modeling of a university academic building created in the DesignBuilder software environment under normal and quarantine modes.

Results. Recommendations for the implementation of energy-saving modes of heating the building of the academic building of the university during the period of distance learning when introducing quarantine restrictions in Ukraine.

Scientific novelty. An integrated approach has been developed to an in-depth analysis of energy consumption under conditions of partial use of the premises of educational buildings during the quarantine period. It is substantiated that the use of premises with partial operation of the building requires additional unit costs for heating needs.

Practical significance. Simulation dynamic modeling of the building's energy consumption for heating for various modes of operation and employment / use of premises of educational buildings during the quarantine period in Ukraine, the results of the study will allow to obtain a set of energy characteristics of the building as a whole and its individual rooms / zones for hourly changes in internal operating conditions and external climatic conditions. The use of the proposed scheme of operation of the heating system of the building of the educational building allows to reduce energy consumption during the heating period by 8,5% compared to energy consumption during normal operation, which is economically feasible in conditions of partial occupancy of the building during quarantine restrictions (during lockdown) and an unpredictable macroeconomic situation on the energy market, causing a trend towards an increase in prices for basic energy resources.

Keywords: quarantine; air temperature; average radiation temperature; work schedule; heat energy consumption; heating system; energy consumption; educational institutions; energy saving.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.2.2>

УДК 621.924.7

¹ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М. Г., ²СКІДАН В.В.

¹ Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», м. Київ, Україна

² Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

КІНЕТОСТАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ШАРНІРНИХ ПРОСТОРОВИХ МЕХАНІЗМІВ ГАЛТУВАЛЬНИХ МАШИН (ЧАСТИНА 2: ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ МАШИНИ З ДВОМА РОБОЧИМИ ЄМКОСТЯМИ, ЩО З'ЄДНАНІ ПОСТУПАЛЬНОЮ КІНЕМАТИЧНОЮ ПАРОЮ)

Мета. Кінетостатичне дослідження статично визначеного шарнірного просторового механізму без надлишкового (пасивного) зв'язку галтувальної машини з двома робочими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою.

Методика. На основі кінетостатичного дослідження визначали радіальні та осьові складові реакцій в усіх обертальних та поступальній кінематичних парах шарнірного статично визначеного просторового механізму машини для обробки деталей з двома робочими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою, при її роботі на холостому ході. Дослідження виконувалося із використанням системи автоматизованого проектування SolidWorks, де було виконано 3D модель галтувальної машини з двома робочими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою.

Результати. Виконано 3D моделювання галтувальної машини з двома робочими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою у системі автоматизованого проектування SolidWorks, визначені максимальні значення радіальних та осьових складових реакцій в усіх обертальних та поступальній кінематичних парах машини, а також досліджено вплив зміни сумарної міжосьової відстані двох робочих ємкостей на приріст максимальних значень реакцій в кінематичних парах просторового механізму машини.

Наукова новизна. Вперше встановлено взаємозв'язок між сумарною міжосьовою відстанню двох робочих ємкостей та зміною максимальних значень реакцій в усіх обертальних та поступальній кінематичних парах галтувальної машини. Визначено допустимий діапазон варіювання сумарною міжосьовою відстанню двох робочих ємкостей, що створює умови для довговічної роботи машини.

Практична значимість. Встановлено, що зміна максимальних значень радіальних та осьових складових реакцій в усіх обертальних та поступальній кінематичних парах просторового механізму галтувальної машини залежить від сумарної міжосьової відстані двох робочих ємкостей машини. Отримані результати досліджень можуть стати у нагоді при проектуванні галтувального обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей.

Ключові слова: міжосьова відстань; галтувальна машина; робоча ємкість.

Вступ. Машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей застосовуються для реалізації технологічних процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин [1], а також галтувальних технологічних операцій [2, 3]. До галтувальних технологічних операцій слід віднести технологічні процеси покращення якості оброблюваної поверхні [4, 5], відділення та сепарація відлитих деталей від ливників [6, 7], подрібнення, помол, заокруглення гострих кромek та країв на поверхні виробів тощо. На відміну від галтувальних машин з обертальним рухом робочих ємкостей [8], а також вібраційних машини [9], у галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей [10], сипке середовище у середині ємкості переміщується зі значно більшою інтенсивністю, при цьому отримує усі ступені свободи, активно контактує з іншими компонентами сипкого середовища та внутрішніми стінками робочої ємкості, що, в цілому, призводить до значного підвищення продуктивності [11] виконання фінішних галтувальних технологічних операцій, зменшенню енерговитрат. Таким

чином, достеменне різнобічне дослідження галтувального обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Постановка завдання. Відомі різні, розроблені авторами, конструкції галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей [12, 13] з відмінними конструктивними властивостями та технологічним призначенням, у кінематичних ланцюгах яких виключено вплив надлишкового (пасивного) зв'язку [14]. Однією з таких конструкцій є машина [15], у якій застосовуються дві робочі ємкості, які за допомогою поступальної кінематичної пари рухомо з'єднані між собою. Використання такої конструкції галтувальної машини дозволяє значно підвищити продуктивність обробки деталей за рахунок того, що виникає можливість на одній машині одночасно виконувати дві різні технологічні операції або одночасно обробляти дві партії різних деталей. Дана конструкція утворює собою семиланковий шарнірний просторовий механізм для якого важливим аспектом є виконання кінетостатичного дослідження, в основі якого є визначення впливу зміни сумарної міжосьової відстані двох робочих ємкостей на максимальні значення реакцій у всіх обертових та поступальній кінематичних парах машини, а також отриманню допустимого діапазону варіювання сумарної міжосьової відстані двох робочих ємкостей, що створить умови для довговічної роботи машини.

Результати дослідження. Попередньо було розроблено конструкцію галтувальної машини з двома робочими ємкостями, які з'єднані між собою поступальною кінематичною парою. Модель конструкції машини з двома робочими ємкостями, яка виконана у САПР solidWorks, представлена на рис. 1.

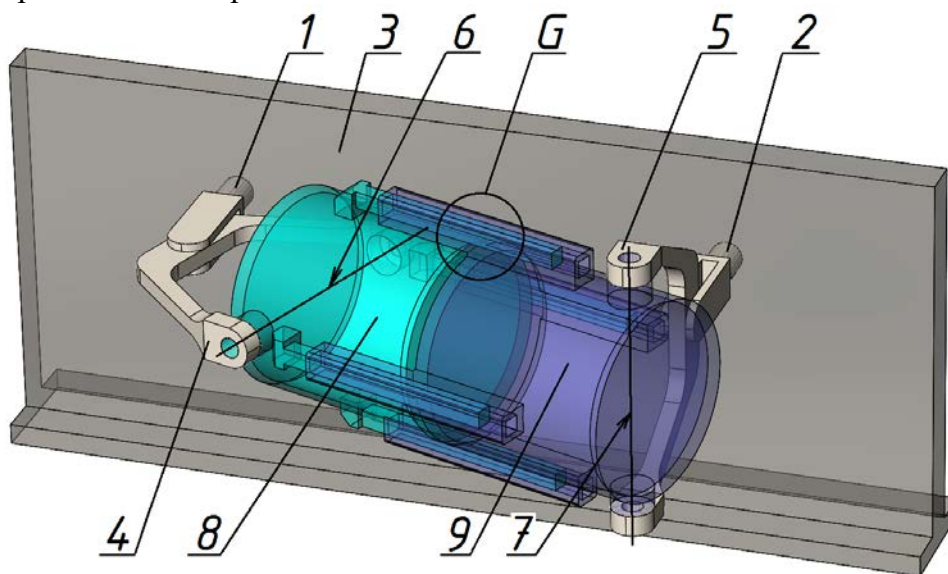


Рис. 1. Модель галтувальної машини з двома робочими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою

Машина містить ведучий 1 та ведений 2 вали, які встановлені у станині 3 паралельно в одній площині. Ведучий 1 та ведений 2 вали шарнірно з'єднані другими кінцями з ведучим шатуном 4 та веденим шатуном 5 відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі яких 6 і 7 є вісями кріплення робочих ємкостей 8 та 9 відповідно. Робочі ємкості 8 та 9 з'єднані між собою за допомогою поступальної кінематичної пари G.

Під час моделювання описаної конструкції галтувальної машини у САПР SolidWorks основні геометричні та конструктивні параметри приймали аналогічними до параметрів промислового змішувача «Turbula T10B» («базова» конструкція машини). Геометричні та конструктивні параметри змодельованої конструкції машини представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Геометричні та конструктивні параметри змодельованої конструкції машини

Геометричний параметр машини	Значення коефіцієнту Δ		
	1,2	1,4	1,6
Діаметр робочих ємкостей d_{PC}	0,318 м		
Загальна міжосьова відстань $l_{PC.3AG}$	0,328 м	0,382 м	0,434 м
Міжосьова відстань ведучого та веденого шатунів $l_{Ш(B)}$	0,272 м		
Маса усіх рухомих деталей машини m_D	83 кг	90 кг	95,5 кг
Кутова швидкість ведучого валу машини $\omega_{ведч.}$	3,2 с ⁻¹ (31 об/хв)		

Використання двох робочих ємкостей (шатунів) у кінематичному ланцюзі машини, які з'єднані між собою поступальною кінематичною парою, дає можливість варіювати їх загальною міжосьовою відстанню $l_{PC.3AG}$. Для раціонального розрахунку загальної міжосьової відстані $l_{PC.3AG}$ можна записати рівняння:

$$l_{PC.3AG} = 2l_{Ц} + l_T, \quad (1)$$

де l_T – технологічний зазор між найближче розташованими торцями ємкостей;

$l_{Ц}$ – довжини робочих ємкостей від осі з'єднання з ведучим чи веденим шатуном до протилежного торця ємкості.

Досліджували, як зміна $l_{PC.3AG}$ впливає на максимальні значення реакцій в усіх кінематичних парах машини, а також при якому значенні загальної міжосьової відстані $l_{PC.3AG}$ реакції у кінематичних парах машини будуть перевищувати попередньо визначені у роботі [16] максимальні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини. Кінетостатичне дослідження виконувалося із застосуванням САПР SolidWorks. Схематичне зображення векторів реакцій в усіх кінематичних парах просторового шарнірного механізму галтувальної конструкції машини з двома робочими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою, представлено на рис. 2.

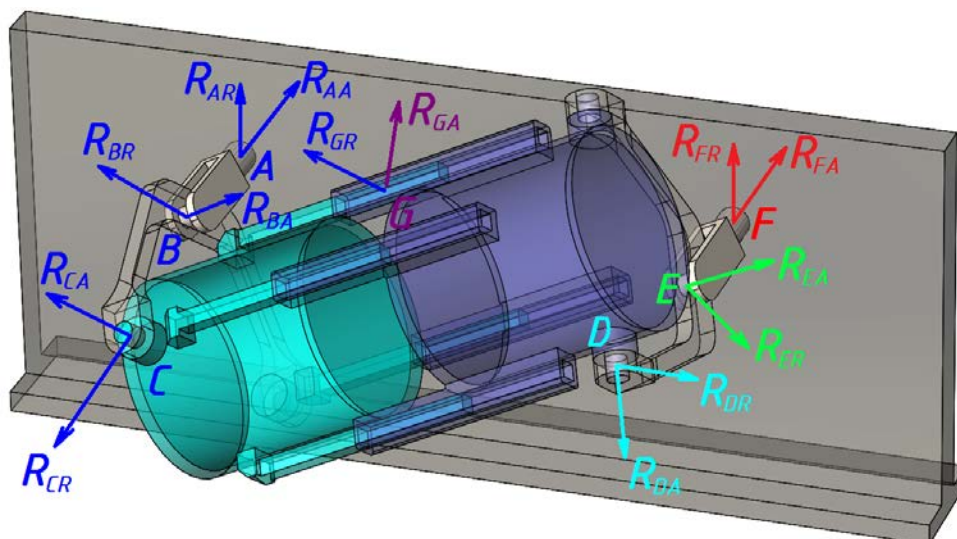


Рис. 2. Розрахункова схема реакцій у кінематичних парах просторового механізму машини з двома робочими ємкостями

Загальну міжосьову відстань $l_{PC.3AG}$ поступово збільшували та спостерігали за зміною реакцій у кінематичних парах машини, для кожної реакції визначали її екстремальні значення. Загальна міжосьова відстань $l_{PC.3AG}$ була виражена коефіцієнтом Δ , який раніше був

запропонований у роботі [10] та характеризує відношення загальної міжосьової відстані робочих ємкостей до міжосьової відстані ведучого чи веденого шатуна машини: $l_{PC.3AG} / l_{ш(В)}$.

Усі кінетостатичні дослідження виконувалися на холостому ході при кутовій швидкості ведучого валу $3,2 \text{ с}^{-1}$. При такій кутовій швидкості ведучого валу машини буде реалізовуватися найбільш інтенсивний режим руху сипкого робочого середовища у середині обох ємкостей, виникатимуть найбільші інерційні навантаження на усі рухомі ланки та кінематичні пари машини. Порівняльні дослідження галтувальної машини з двома робочими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою проводили лише на холостому ході у зв'язку з тим, що результати силового дослідження «базової» конструкції машини, які представлені у роботі [16] показали, що усі значення реакцій у кінематичних парах машини, при її роботі на робочому ході, були пропорційно збільшені на однакову величину по відношенню до значень реакцій у кінематичних парах машини при роботі її на холостому ході.

Визначали максимальні значення реакцій R в усіх обертових кінематичних парах A , B , C , D , E , F та поступальній кінематичній парі G . Значення реакцій були розподілені на дві складові: радіальну та осьову, де: R_{AA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «станина – ведучий вал»; R_{AR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «станина – ведучий вал»; R_{BA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведучий вал – ведучий шатун»; R_{BR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведучий вал – ведучий шатун»; R_{CA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведучий шатун – перша робоча ємкість»; R_{CR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведучий шатун – перша робоча ємкість»; R_{DA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «друга робоча ємкість – ведений шатун»; R_{DR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «друга робоча ємкість – ведений шатун»; R_{EA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведений шатун – ведений вал»; R_{ER} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведений шатун – ведений вал»; R_{FA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведений вал – станина»; R_{FR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведений вал – станина»; R_{GA} , R_{GR} – складові реакцій у поступальній кінематичній парі «перша робоча ємкість – друга робоча ємкість».

У табл. 2 представлено визначені максимальні значення реакцій у зазначених вище кінематичних парах машини в залежності від зміни коефіцієнту Δ , а також значення реакцій у відповідних кінематичних парах просторового механізму «базової» конструкції машини, що відповідає коефіцієнту $\Delta = 1$.

Таблиця 2.

**Максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини
при різних значеннях коефіцієнту Δ**

		Коефіцієнт Δ			
		1,0	1,2	1,4	1,6
Значення реакцій в кінематичних парах машини	R_{AA} , [Н]	88	151	277	485
	R_{FA} , [Н]	68	150	280	499
	R_{AR} , [Н]	405	450	512	900
	R_{FR} , [Н]	608	418	753	1699
	R_{BA} , [Н]	198	101	105	158
	R_{EA} , [Н]	124	142	210	371
	R_{BR} , [Н]	294	380	455	873
	R_{ER} , [Н]	545	422	780	1760
	R_{CA} , [Н]	95	138	250	505
	R_{DA} , [Н]	194	133	149	301
	R_{CR} , [Н]	325	365	733	1901
	R_{DR} , [Н]	342	278	512	1212
	R_{GA} , [Н]	-----	86	178	379
	R_{GR} , [Н]	-----	115	155	340

Згідно результатів досліджень, представлених у табл. 2 було створено відповідні графіки залежності максимальних значень реакцій у кінематичних парах шарнірного просторового механізму машини з двома робочими ємкостями від зміни коефіцієнту Δ , які представлені на рис. 3 (радіальні складові реакцій) та рис. 4 (осьові складові реакцій).

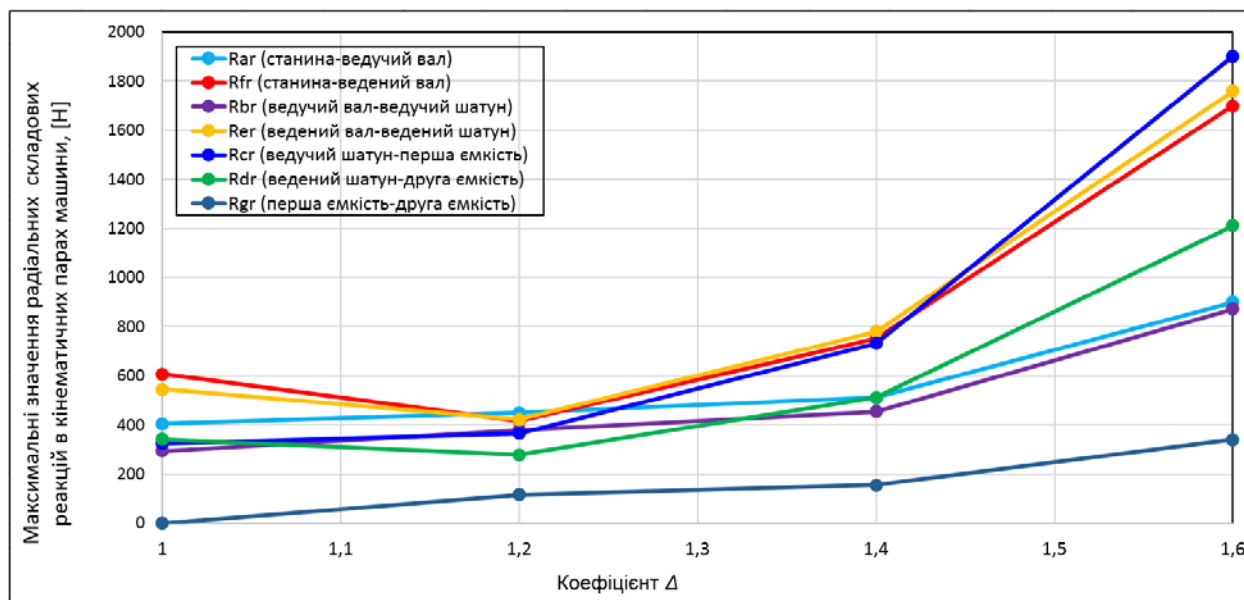


Рис. 3. Залежність максимальних значень радіальних складових реакцій в кінематичних парах просторового механізму від зміни коефіцієнту Δ

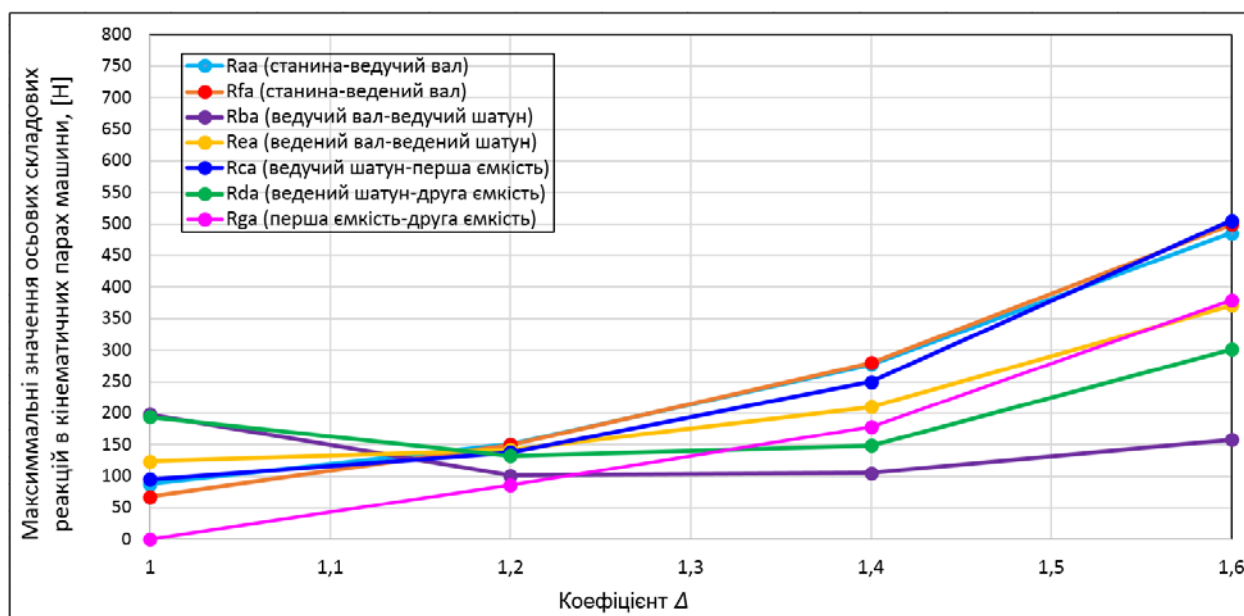


Рис. 4. Залежність максимальних значень осьових складових реакцій в кінематичних парах просторового механізму від зміни коефіцієнту Δ

У досліджуваній конструкції машини, при коефіцієнті $\Delta = 1,2$ такі складові реакцій, як R_{FR} , R_{BA} , R_{ER} , R_{DA} та R_{DR} стали меншими за відповідні значення реакцій у «базовій» конструкції машини, усі інші реакції збільшилися на відносно незначну величину. З подальшим збільшенням коефіцієнту Δ спостерігалася вже інтенсивне збільшення реакцій практично в усіх кінематичних парах. При коефіцієнті $\Delta = 1,4$ вже 12 з 14 складових реакцій перевищили

значення реакцій у «базовій» конструкції машини, при чому, такі реакції, як R_{AA} , R_{FA} збільшилися у більш ніж три рази по відношенню до реакцій у «базовій» конструкції машини. При подальшому збільшенні загальної міжосьової відстані машини значення реакцій у кінематичних парах будуть зростати значно інтенсивніше, що призведе до необхідності посилення рухомих вузлів машини за рахунок збільшення їх жорсткості та міцності, що, в свою чергу, призведе до значного підвищення вартості даного типу обладнання.

Висновки.

1. За допомогою САПР SolidWorks виконано кінетостатичне дослідження просторового статично визначеного семиланкового шарнірного механізму галтувальної машини з двома робочими ємкостями, що з'єднані між собою поступальною кінематичною парою, зокрема, визначено радіальні та осьові складові реакції в усіх обертальних та поступальній кінематичних парах.

2. Досліджено вплив зміни загальної міжосьової відстані машини, що характеризується коефіцієнтом Δ на приріст максимальних значень реакцій в усіх обертальних та поступальній кінематичних парах.

3. Встановлено, що досліджувану конструкцію машини раціонально використовувати в діапазоні зміни коефіцієнту $\Delta = [1,0-1,3]$. При коефіцієнті $\Delta > 1,4$ спостерігалася значне збільшення максимальних значень більшості реакцій у порівнянні з максимальними значеннями реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини.

References

1. Marigo, M. (2012). Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. The University of Birmingham, UK. 316 p.
2. Zaliubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Malyshev, V. V. (2020). Perspektivni tekhnologii obrobky detalei ta zmishuvannya sypanykh rechovyn u rukhomykh robochykh yemkostiakh (chastyna 1: sposoby tekhnologichnykh operatsii) [Advanced technologies for processing parts and mixing bulk materials in mobile working tanks (part 1: methods of technological operations)]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky*, No. 2, Vol. 31(70), P. 29–35 [in Ukrainian].
3. Burmistenkov, O. P. et al. (2007). Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalantereinii promyslovosti: monohrafiia [Manufacture of cast details and articles of polymeric materials in the shoe and leather industry: monograph]. Khmelnytskyi. 255 p. [in Ukrainian].
4. Zalyubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Smirnov, Y. I., Klaptsov, Y. V., Malyshev, V. V. (2019). Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working container. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, 2(132), P. 24–32.

Література

1. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. The University of Birmingham, UK., 2012. 316 p.
2. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Перспективні технології обробки деталей та змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 1: способи технологічних операцій). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 2, Том 31 (70). С. 29–35.
3. Бурмістенков О. П., Злотенко Б. М., Коновал В. П., Панасюк І. В., Скиба М. Є., Синюк О. М. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія. Хмельницький, 2007. 255 с.
4. Zalyubovskiy M. G., Panasyuk I. V., Smirnov Y. I., Klaptsov Y. V., Malyshev V. V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working container. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. № 2. Vol. 132, C. 24–32.

5. Zalyubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Smirnov, Y. I., Kuznetsova, O. O., Malyshev, V. V. (2019). Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, 3(134), 9–17.
6. Zalyubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Malyshev V. V. (2019). Eksperymentalne vyznachennia enerhii neobkhidnoi dlia viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv [Experimental determination of the energy required to separate metal parts from foundries]. *Visnyk Kyiv National University of Technologies and Design – Bulletin of the KNUVD*, 6(140), 9–17 [in Ukrainian].
7. Shvarts, A. I. (1987). *Mehanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva formovyih RTI: Uchebnoe posobie dlya rabocheho obrazovaniya* [Mechanization and automation of the production of molded rubber goods: a textbook for workers' education]. Moscow. 176 p. [in Russian].
8. Pershin, V. F., Odnolko, V. G., Pershina, S. V. (2009). *Pererabotka sypanykh materialov v mashinakh barabannogo tipa* [Processing bulk materials in drum type machines]. Moscow: Mashinostroenie. 220 p. [in Russian].
9. Mayer-Laigle, C., Gatumel, C., & Berthiaux, H. (2015). Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, 95, 248–261. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.11.003>.
10. Zalyubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Malyshev, V. V. (2007). *Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei: monohrafiia* [Machines with complex movement of working capacities for processing of polymer parts]. Kyiv. 228 p. [in Ukrainian].
11. Zaliubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Malyshev, V. V. (2020). Perspektivni tekhnolohii obrobky detalei i zmishuvannia sypanykh rechovin u rukhomykh robochykh yemkostiakh (chastyna 2: typy obladnannia z rukhomymy yemkostiamy) [Advanced technologies for processing parts and mixing bulk materials in mobile working tanks (part 2: types of equipment with moving tanks)], *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky*, No. 3, Vol. 31(70), P. 7–13 [in Ukrainian].
12. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V. (2020). On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*, 56(1), P. 54–64.
5. Zalyubovskiy M. G., Panasyuk I. V., Smirnov Y. I., Kuznetsova O. O., Malyshev V. V. Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. Vol. 3 (134). P. 9–17.
6. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Експериментальне визначення енергії необхідної для відділення металевих деталей від ливників. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 6 (140). С. 9–17.
7. Шварц А. И. Механизация и автоматизация производства формовых РТИ: учебное пособие для рабочего образования. М.: Химия, 1987. 176 с.
8. Першин В. Ф., Однолько В. Г., Першина С. В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа: монография. М.: Машиностроение, 2009. 220 с.
9. Mayer-Laigle C., Gatumel C., Berthiaux H. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. March 2015. Vol. 95. P. 248–261. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.11.003>.
10. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. *Машины зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей: монографія*. К.: Університет "Україна", 2018. 228 с.
11. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Перспективні технології обробки деталей і змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 2: типи обладнання з рухомими ємкостями). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 3, Том 31 (70). С. 7–13.
12. Zalyubovskii M. G., Panasyuk I. V. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*. April 2020. Vol. 56, Issue 1, P. 54–64.

13. Zaliubovskiy, M. G., Panasiuk, I. V., Smirnov, Yu. I., Malyshev, V. V. (2020). Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Vol. 178, Iss. 4, P. 69–75.

14. Reshetov, L. N. (1972). *Konstruirovaniye ratsionalnykh mekhanizmov* [Designing rational mechanisms]. Moscow. 256 p. [in Russian].

15. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V. (2020). Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels. *International Applied Mechanics*, 56(6), 762–772.

16. Zaliubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Malyshev, V. V. (2020). Sylove doslidzhennia prostorovoho shestylankovoho mekhanizmu mashyny dlia obrobky detalei (chastyna 1: doslidzhennia pry roboti mashyny na kholostomu khodi) [Power study of the spatial six-link mechanism of the machine for machining parts (part 1: study when the machine is idling)]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky*, No. 5, Vol. 31(70), P. 13–18 [in Ukrainian].

13. Zaliubovskiy M. G., Panasiuk I. V., Smirnov Yu. I., Malyshev V. V. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. Vol. 178. Iss. 4. P. 69–75.

14. Решетов Л. Н. Конструирование рациональных механизмов. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: Машиностроение, 1972. 256 с.

15. Zalyubovskii M. G., Panasyuk I. V. Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels. *International Applied Mechanics*. 2020. Vol. 56. Iss. 6. P. 762–772.

16. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Силові дослідження просторового шестиланкового механізму машини для обробки деталей (частина 1: дослідження при роботі машини на холостому ході). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 5, Том 31 (70). С. 13–18.

ZALIUBOVSKIY MARK

Open University of Human Development
"Ukraine", Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6258-0088>
E-mail: markzalubovskiy@gmail.com

SKIDAN VLADYSLAVA

Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8358-9759>
E-mail: v.v.skidan@ukr.net

¹ЗАЛЮБОВСКИЙ М. Г., ²СКИДАН В.В.

¹ Открытый международный университет развития человека «Украина», г. Киев, Украина

² Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**КИНЕТОСТАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШАРНИРНОГО
ПРОСТРАНСТВЕННОГО МЕХАНИЗМА ГАЛТОВОЧНОЙ МАШИНЫ (ЧАСТЬ 2:
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА МАШИНЫ С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ЕМКОСТЯМИ,
СОЕДИНЕННЫМИ ПОСТУПАТЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПАРОЙ)**

Цель. Кинестатическое исследования статически определенного шарнирного пространственного механизма без избыточной (пассивной) связи галтовочной машины с двумя рабочими емкостями, которые соединены между собой поступательной кинематической парой.

Методика. На основе кинестатического исследования определяли радиальные и осевые составляющие реакций во всех вращательных и поступательной кинематических парах шарнирного статически определенного пространственного механизма машины для обработки деталей с двумя рабочими емкостями, которые соединены между собой поступательной кинематической парой, при ее работе на холостом ходу. Исследование выполнялось с использованием системы автоматизированного проектирования SolidWorks, где было реализовано 3D модель галтовочной машины с двумя рабочими емкостями, которые соединены между собой поступательной кинематической парой.

Результаты. Выполнено 3D моделирование галтовочной машины с двумя рабочими емкостями, которые соединены между собой поступательной кинематической парой в системе автоматизированного проектирования SolidWorks, определены максимальные значения радиальных и осевых составляющих реакций во всех вращательных и поступательной кинематических парах машины, а также исследовано влияние изменения суммарного межсосевого расстояния двух рабочих емкостей на прирост максимальных значений реакций в кинематических парах пространственного механизма машины.

Научная новизна. Впервые определена взаимосвязь между суммарным межсосевым расстоянием двух рабочих емкостей и изменением максимальных значений реакций во всех вращательных и поступательной кинематических парах галтовочной машины. Определен допустимый диапазон варьирования суммарным межсосевым расстоянием двух рабочих емкостей, что создает условия для долговечной работы машины.

Практическая значимость. Определено, что изменение максимальных значений радиальных и осевых составляющих реакций во всех вращательных и поступательной кинематических парах пространственного механизма галтовочной машины зависит от суммарного межсосевого расстояния двух рабочих емкостей машины. Полученные результаты исследований могут быть использованы при проектировании галтовочного оборудования со сложным пространственным движением рабочих емкостей.

Ключевые слова: межсосевое расстояние; галтовочная машина; рабочая емкость.

¹ZALYUBOVSKIY M. G., ²SKIDAN V.V.

¹ Open International University of Human Development "Ukraine", Kyiv, Ukraine

² Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

KINETOSTATIC INVESTIGATION OF HINGED SPATIAL MECHANISMS OF GALTING MACHINES (PART 2: INVESTIGATION OF MECHANISM OF A MACHINE WITH TWO HUNDRED WORKS)

Goal. Kinetostatic study of a statically defined hinged spatial mechanism without excessive (passive) connection of the shredding machine with two working tanks connected by a translational kinematic pair.

Method. Radial and axial components of reactions in all rotating and translational kinematic pairs of the hinged statically defined spatial mechanism of the machine for processing of details with two working capacities connected among themselves by translational kinematic pair at its work at idling were determined on the basis of kinetostatic research. The study was performed using the computer-aided design system SolidWorks-2016 computer-aided design system, which performed a 3D model of a shredding machine with two working tanks connected by a translational kinematic pair.

Results. 3D modeling of a shredding machine with two working tanks connected by translational kinematic pair in the computer-aided design system SolidWorks-2016 computer-aided design system is performed, maximum values of radial and axial components of reactions in all rotating and translational kinematic pairs of machine are determined, and the influence of total two working tanks for the increase of the maximum values of reactions in the kinematic pairs of the spatial mechanism of the machine.

Scientific novelty. For the first time, the relationship between the total wheelbase of two working tanks and the change in the maximum values of reactions (axial and radial) in all rotating and translational kinematic pairs of the shredding machine was established. The allowable range of variation of the total wheelbase of two working tanks is determined, which creates conditions for long-term operation of the machine.

Practical significance. It is established that the change of maximum values of radial and axial components of reactions in all rotating and translational kinematic pairs of the spatial mechanism of the galvanizing machine depends on the total axial distance of two working capacities of the machine. The obtained research results can be useful in the design of shredding equipment with complex spatial movement of working tanks.

Keywords: wheelbase; shredding machine; working capacity.

УДК 620.
194.22

¹НИРКОВА Л. І.¹, ¹ЛІСОВИЙ П. Е., ¹ГОНЧАРЕНКО Л. В.,
¹ОСАДЧУК С. О., ¹КЛИМЕНКО А. В., ²БОРИСЕНКО Ю. В.,
²БРАТОЧКИН О. В.

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

²Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ КОРОЗІЙНОГО РОЗТРІСКУВАННЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ 10Г2ФБ У МОДЕЛЬНОМУ ГРУНТОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗА КАТОДНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Мета. Дослідити закономірності корозійного розтріскування сталі трубного сортаменту 10Г2ФБ в умовах катодного захисту.

Методика. Застосовували такі методи: деформації з малою швидкістю, вольтамперометрії, метод растрової електронної мікроскопії, електролітичного наводнювання, масометрії.

Результати. Вивчено закономірності корозійного розтріскування трубної сталі 10Г2ФБ у модельному ґрунтовому середовищі NS4 в діапазоні потенціалів від потенціалу корозії до $-1,2$ В. За результатами комплексу корозійно-механічних, електрохімічних та фізичних досліджень встановлено, що при зміщенні потенціалу катодної поляризації в ряду $-0,75$ В $\rightarrow -0,95$ В $\rightarrow -1,05$ В $\rightarrow -1,2$ В коефіцієнт схильності цієї сталі до корозійного розтріскування K_S зростає $1,09 \rightarrow 1,11 \rightarrow 1,13 \rightarrow 1,26$. Концентрація водню, що проникає в сталь за цих потенціалів, змінюється немонотонно: $0 \rightarrow 0 \rightarrow 0,057 \rightarrow 0,018$ моль/дм³. Швидкість залишкової корозії при зсуві потенціалу в ряду $E_{кор} \rightarrow -0,75$ В $\rightarrow -0,95$ В $\rightarrow -1,05$ В зменшується спочатку різко, потім повільно: $0,035$ мм/рік $\rightarrow 0,005$ мм/рік $\rightarrow 0,0009$ мм/рік $\rightarrow 0,0004$ мм/рік, тобто за високих катодних потенціалів прикладена поляризація витрачається на розклад водного електроліту з виділенням водню, який проникає в сталь та викликає крихке розтріскування, що підтверджено зростанням частки крихкого руйнування в морфології зламів разків.

Наукова новизна. Отримані нові дані фундаментальних досліджень щодо закономірностей корозійного розтріскування сталі феритно-перлітного класу трубного сортаменту 10Г2ФБ в умовах катодного захисту в діапазоні потенціалів від потенціалу корозії до $-1,2$ В. Виявлено, що особливостями впливу катодної поляризації в зазначеному діапазоні потенціалів при оцінюванні за коефіцієнтом схильності до корозійного розтріскування K_S є збільшення відносного звуження та зменшення відносного видовження, що в цілому вказує на окрхчення металу під дією корозивного середовища та потенціалу. Міцнісні характеристики залишаються майже на тому самому рівні. Найбільша схильність до корозійного розтріскування спостерігається за потенціалу поляризації $-1,0$ В та від'ємніше.

Практична значимість. Застосовано розроблену методологію комплексного дослідження закономірностей корозійного розтріскування на прикладі дослідження сталі трубного сортаменту 10Г2ФБ в модельному ґрунтовому середовищі NS4 в умовах, що моделюють умови експлуатації. Отримані нові дані закономірностей корозійного розтріскування цієї сталі будуть корисними для попередження корозійного розтріскування магістральних газопроводів під час експлуатації.

Ключові слова: сталь трубного сортаменту 10Г2ФБ; вольтамерометрія; метод деформації з малою швидкістю; катодний потенціал; електрохімічна корозія; корозійне розтріскування.

Вступ. Найнебезпечнішим явищем, яке призводить до аварій на підземних магістральних газопроводах, є корозійне розтріскування (КР) [1, 2]. Це питання є актуальним для всіх, без виключення країн, в яких експлуатуються підземні газопроводи [3]. Робота є частиною досліджень, проведених з метою накопичення даних щодо схильності сталей, з яких побудовані магістральні газопроводи України, до КР при катодному захисті.

При контакті з нейтральним корозивним середовищем на поверхні стінки труби за катодної поляризації утворюється водень [4–10]. Механізм перебігу корозійних процесів в

умовах катодного захисту має особливості. На сьогодні дослідники світу дотримуються думки про те, що КР у розчинах з рН, близьких до нейтральних перебігає за сумісної дії анодного розчинення та водневого окрихчення сталі, і залежно від рівня катодної поляризації, превалює той чи інший механізм [11–15]. Також відомо, що залежно від корозивності середовища та складу сталі розрізняється діапазон потенціалів, в яких діють механізми анодного розчинення та водневого окрихчення. Проведення комплексу фундаментальних досліджень, за результатами яких можна встановити закономірності корозійного розтріскування сталей трубного сортаменту, наприклад 10Г2ФБ, є актуальною задачею.

Постановка завдання. Враховуючи актуальність питання корозійного розтріскування магістральних газопроводів, зокрема на території України, мета роботи полягала у дослідженні закономірностей корозійного розтріскування трубної сталі 10Г2ФБ при катодному захисті та встановленні діапазону потенціалів крихкого руйнування.

Методи та матеріали. Зразки для досліджень вирізали з листів сталі трубного сортаменту 10Г2ФБ товщиною 16,5 мм поперек прокату. Хімічний склад є типовим для такої сталі, ваг. %: 0,096 С; 1,71 Мн; 0,208 Si; 0,009 S; 0,07 Р; 0,035 Al; 0,03 Ni; 0,03 Мо; 0,015 Ti; 0,06V; 0,052 Nb; 0,002 В. Механічні властивості сталі 10Г2ФБ: межа плинності $\sigma_{0,2}$ – (400–430) МПа; межа міцності σ_B – (560–580) МПа; відносне видовження δ – 20 %.

Для корозійно-механічних випробувань зразки виготовляли згідно з ескізом (рис. 1). Зразки вирізали поперек прокату листа.

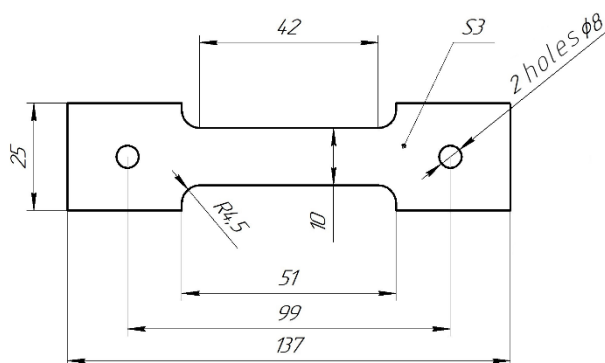


Рис. 1. Ескіз зразка для корозійно-механічних досліджень

Зразки розтягували в повітрі та в розчині зі швидкістю 10^{-6} с^{-1} на розривній машині АИМА-5-1. Робочий розчин – модельний ґрунтовий електроліт NS4 складу: 0,122 г/л KCl + 0,483 г/л NaHCO₃ + 0,181 г/л CaCl₂ + 0,131 г/л MgSO₄, рН 8,2 [15–18].

Ступінь електролітичного наводнювання сталі визначали за методикою ГОСТ Р 9.915 [19] в діапазоні катодних потенціалів від -0,75 В до -1,2 В з кроком 0,05 В. Потенціали задавали за допомогою потенціостата ПИ-50-1.1 та програматора ПР-8. Зразки випробовували на корозійне розтріскування за періодичного змочування розчином за циклом 50 хвилин у розчині, 10 хвилин у повітрі у діапазоні потенціалів катодної поляризації від -0,75 до -1,2 В (відносно хлоридсрібного електрода, х.с.е.). Схильність сталі до КР оцінювали за безрозмірним коефіцієнтом $K_S = \frac{\psi_n}{\psi_p}$, згідно з розробленою раніше методикою [15], де ψ_n , ψ_p

– відносне звуження зразків у повітрі та розчині, відповідно. Для оцінювання деградації показників відносного подовження та межі міцності розраховували коефіцієнти втрати властивостей F відносно аналогічних показників на повітрі: $F = \left(1 - \frac{F_p}{F_n}\right) \times 100\%$, де F_n , F_p – значення відповідного показника під час випробувань на повітрі та у розчині.

Результати дослідження.

Мікроструктура сталі – дисперсна феритно-перлітна суміш з видовженням зерен в напрямку прокату. Характерна мікроструктура сталі наведена на рис. 2 а.

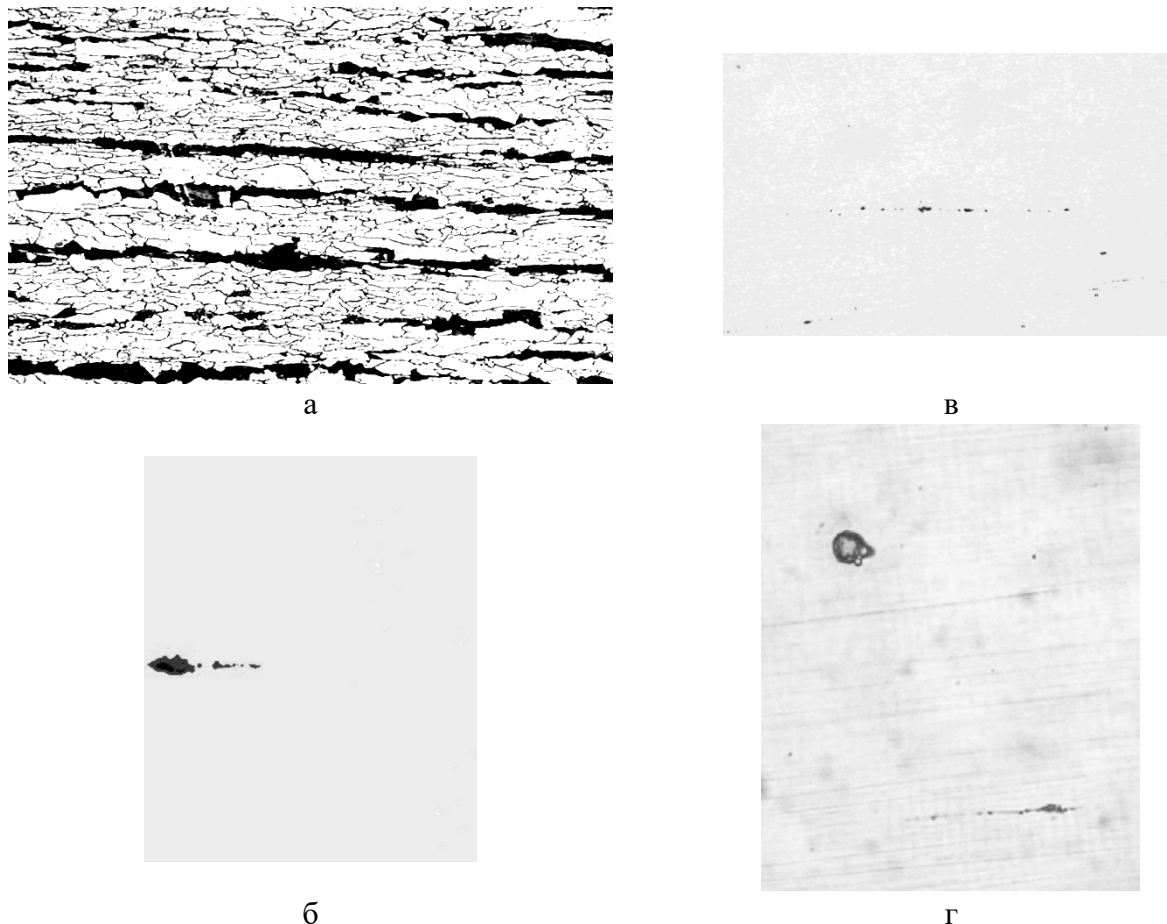


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 400$) та неметалеві включення сталі 10Г2ФБ ($\times 500$):
а – мікроструктура; б – оксиди; в – силікати; г – глобулярні включення

Феритне зерно відповідає (10–11) номеру згідно з ГОСТ 5639; смугастість металу – (3–4) балу, ряд Б згідно з ГОСТ 5640. Твердість сталі знаходиться в межах (180–190) HV. Структурні характеристики є типовими для сталі контрольованої прокатки, мікролегованої ванадієм і ніобієм. Неметалеві включення, переважно, дрібні глобулярні оксиди і оксисульфідів, рис. 2, б. Спостерігається невелика кількість оксидів стрічкових і силікатів крихких у вигляді стрічок, розташованих вздовж текстури прокату рис. 2, в. Забрудненість неметалевими включеннями згідно з ГОСТ 1778 відповідає (1,5–2) балу. Спостерігається дещо більша кількість складних глобулярних включень великого розміру (до 5 мкм), рис. 2, г.

Корозійно-механічні та фрактографічні дослідження. Діаграми руйнування представлені на рис. 3. Руйнування зразків у повітрі відбувалося в'язко, з характерним утягуванням біля місця розриву та утворенням ділянок, які зазнали пластичної деформації, рис. 3. Межа міцності дорівнювала ~ 512 МПа, відносне видовження $\sim 28,0\%$. Морфологія зламу в'язка (ямкового характеру), розмір ямок, в основному не перевищує ~ 50 мкм, рис. 4, а.

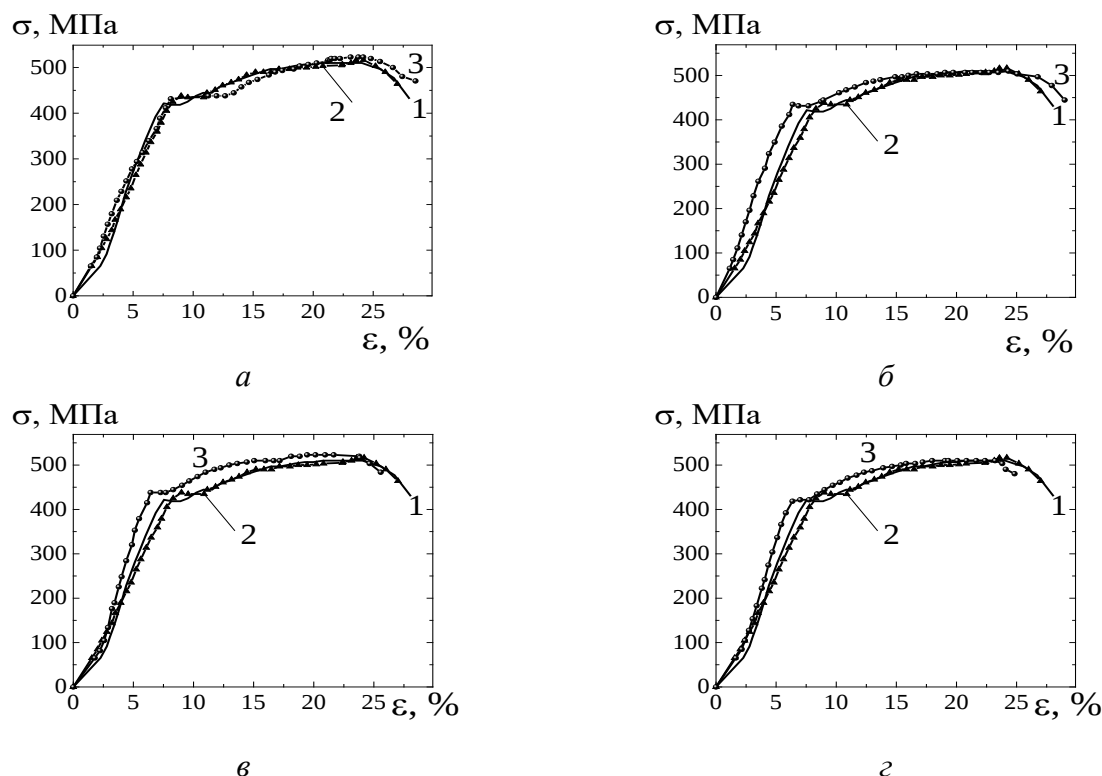


Рис. 3. Діаграми руйнування зразків зі сталі 10Г2ФБ після корозійно-механічних випробувань у розчині NS4 за різних умов:

1 – у повітрі; 2 – за потенціалу корозії; 3 – за потенціалів поляризації:
а – -0,75 В; б – -0,95 В; в – -1,05 В; г – -1,2 В

Після руйнування зразків у розчині за потенціалу корозії (рис. 3, крива 2) спостерігали незначне зменшення максимального навантаження приблизно на ~2% та відносного видовження на ~3,7% порівняно з такими самими показниками у повітрі, рис. 5 (криві 1,2, відповідно). Превалює в'язкий (ямковий) характер зламу, але ямки крупніше, ніж під час руйнування у повітрі, рис. 4, б. Розраховане значення коефіцієнту схильності до корозійного розтріскування дорівнює 1,07, рис. 5 (крива 3).

За мінімального захисного потенціалу -0,75 В ознаки в'язкого руйнування залишаються, лінія розриву хвиляста, наявне утягування біля крайки розриву, рис. 4, в, коефіцієнт K_s дорівнює 1,09, рис. 5 (крива 3). В морфології зламів відмічається укрупнення ямок та зменшення їх глибини порівняно із поверхнею руйнування зразка за потенціалу корозії рис. 4, в.

За потенціалу -0,95 В спостерігається тенденція до зменшення частки в'язкого руйнування та зростання частки крихкого, на що вказує зміна вигляду лінії розриву, яка набуває форми складної ламаної зі сходинками розриву, рис. 4, г, збільшення коефіцієнту K_s до 1,11, рис. 5 (крива 3). В морфології зламів відмічається укрупнення ямок та зменшення їх глибини, поява плоских ділянок руйнування рис. 4, г.

За максимального захисного потенціалу -1,05 В в області руйнування переважає крихкий характер, звуження зразка помітно менше, рис. 4, д, лінія розриву складна ламана, видні сходинки розриву та вторинні тріщини. Показники зниження межі міцності та відносного видовження становлять ~1,0 % та ~8,8 %, відповідно, коефіцієнт схильності до КР дорівнює 1,13, рис. 5 (крива 3). На поверхні руйнування превалюють майже плоскі ділянки

руйнування більшої площі довжиною від 10 до 30 мкм, ніж на зразках, зруйнованих при менш від'ємних потенціалах, рис. 4, в.



Рис. 4. Вигляд області руйнування зразків зі сталі 10Г2ФБ після корозійно-механічних випробувань за різних умов та фрактограми поверхонь руйнування, $\times 500$:

а – у повітрі; б – за потенціалу корозії; за потенціалів катодної поляризації в – -0,75 В;
г – -0,95 В; д – -1,05 В; е – -1,20 В

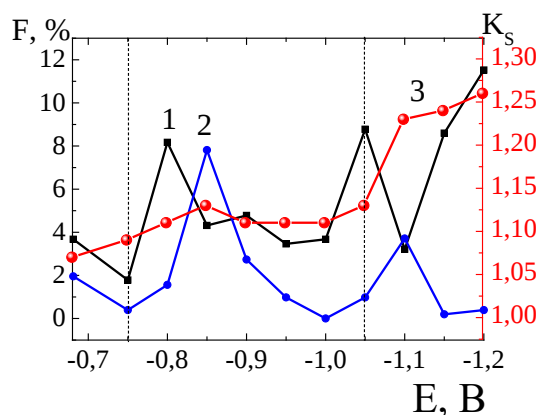


Рис. 5. Зміна коефіцієнтів втрати властивостей зразків зі сталі 10Г2ФБ залежно від потенціалу після корозійно-механічних випробувань у розчині NS4: 1 – межа міцності; 2 – відносне видовження; 3 – коефіцієнт схильності до КР

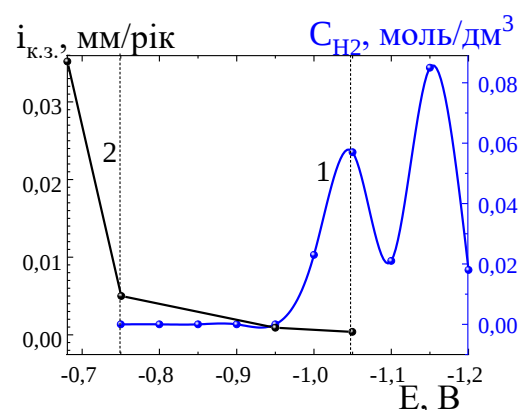


Рис. 6. Зміна концентрації водню, що проникає в сталь при катодній поляризації та швидкості залишкової корозії сталі 10Г2ФБ залежно від потенціалу у розчині NS4: 1 – концентрація водню; 2 – швидкість залишкової корозії

За потенціалу -1,2 В відмічається тенденція до зростання частки крихкого руйнування, що корелює із зменшенням відносного звуження, рис. 4, е. Лінія розриву – складна східчаста ламана, рис. 5, е. Показники зниження межі міцності та відносного видовження змінюються неоднозначно, коефіцієнт K_s продовжує зростати до 1,26, рис. 5 (крива 3). На поверхні руйнування збільшується кількість плоских ділянок руйнування та їх площа, зменшується частка ямок та їх глибина, рис. 4, е.

Дослідження проникнення водню в сталь та швидкості залишкової корозії при катодній поляризації. Для пояснення причин розвитку крихкого руйнування за катодної поляризації дослідили процес проникнення водню в сталь 10Г2ФБ, що утворюється у нейтральному або слаболужному водному розчині згідно з реакцією:



За результатами досліджень встановили, що проникнення водню починається за потенціалу -1,0 В (його вміст в сталі за такого потенціалу становить $C_{\text{H}_2} = 0,023$ моль/дм³). При зміщенні потенціалу поляризації до від'ємніших значень спостерігається немонотонне зміння вмісту водню в сталі, але в цілому можна простежити тенденцію до збільшенні його кількості, рис. 6, крива 1. Слід відзначити, що саме в цьому діапазоні потенціалів починається зростання схильності сталі 10Г2ФБ до корозійного розтріскування, рис. 5 (крива 3).

Ще однією важливою характеристикою ефективності катодного захисту є швидкість залишкової корозії ($i_{\text{к.з.}}$), представлена на рис. 6 (крива 2). Видно, що її значення зменшується досить різко при зсуві потенціалу від потенціалу корозії до -0,75 В, а саме: від 0,035 мм/рік без поляризації до 0,005 мм/рік при наведенні мінімального захисного потенціалу. Подальше збільшення за абсолютним значенням потенціалу поляризації суттєво не зменшує швидкість залишкової корозії, значення якої знаходяться в межах від 0,0009 мм/рік до 0,0004 мм/рік. При збільшенні потенціалу катодної поляризації відбувається розклад водного електроліту з виділенням водню, який проникає в сталь та викликає крихке розтріскування. Процес впровадження водню в сталь протікає інтенсивніше за дії механічних напружень. Цим пояснюється збільшення частки крихкого руйнування та відповідне зростання схильності до корозійного розтріскування.

Висновки:

1. Катодна поляризація у нейтральному ґрунтовому середовищі найбільш сильно впливає на показник відносного звуження сталі 10Г2ФБ; в меншій мірі – на відносне видовження, що в цілому вказує на окрихчення металу під дією корозивного середовища та потенціалу. Міцнісні характеристики залишаються майже на тому самому рівні.

2. За результатами комплексу корозійно-механічних, електрохімічних та фізичних методів досліджень встановлено, що при збільшенні за абсолютним значенням потенціалу катодної поляризації $-0,75\text{ В} \rightarrow -0,95\text{ В} \rightarrow -1,05\text{ В} \rightarrow -1,2\text{ В}$ схильність цієї сталі, оцінена за коефіцієнтом K_S до корозійного розтріскування зростає $1,09 \rightarrow 1,11 \rightarrow 1,13 \rightarrow 1,26$. При цьому немонотонно зростає концентрація водню, що проникає в сталь $0 \rightarrow 0 \rightarrow 0,057 \rightarrow 0,018$ моль/дм³.

3. Швидкість залишкової корозії різко зменшується при зсуві потенціалу від потенціалу корозії до $-0,75\text{ В}$: від $0,035$ мм/рік без поляризації до $0,005$ мм/рік. Подальше збільшення за абсолютним значенням потенціалу поляризації суттєво не зменшує швидкість залишкової корозії, значення якої знаходяться в межах від $0,0009$ мм/рік до $0,0004$ мм/рік, але викликає розклад водного електроліту з виділенням водню, який проникає в сталь та сприяє розвитку крихкого розтріскування. Цим пояснюється зростання схильності до корозійного розтріскування та збільшення частки крихкого руйнування в зламах.

Робота виконана за підтримки Національної академії наук України у 2019–2021 рр. (державний реєстраційний номер теми 0118U100537).

References

Література

- | | |
|--|--|
| <p>1. Antonov, V. H. Et et al. (2006). Korrozyonnoe rastreskyvanye pod napriazheniem trub mahystralnykh hazoprovodov: atlas [Stress Corrosion Cracking of Trunk Gas Pipelines: Atlas]. Moscow: Nauka. 105 p. [in Russian].</p> <p>2. Cheng, Y. F. (2013). Stress corrosion of pipeline / edited by R. Winston. New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 288 p.</p> <p>3. Krasovskiy, A. Ya., Lokhman, Y. V., Oryniak, Y. V. (2012). Stress-korrozyonnje razrusheniya mahystralnykh truboprovodov [Stress corrosion destruction of main pipelines]. <i>Problemy prochnosti = Strength problems</i>, № 2, P. 23–43 [in Russian].</p> <p>4. Liu, Z. Y., Li, X. G., Du, C. W., Cheng, Y. F. (2009). Local additional potential model for effect of strain rate on SCC of pipeline steel in an acidic soil solution. <i>Corrosion Science</i>, Vol. 51, Is. 12, P. 2863–2871.</p> <p>5. Liu, Z. Y., Li, X. G., Du, C. W., Zhai, G. L., Cheng, Y. F. (2008). Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment. <i>Corrosion Science</i>, Vol. 50, Is. 8, P. 2251–2257.</p> <p>6. Dey, S., Mandhyan, A. K., Sondhi, S. K., Chatteraj, I. (2006). Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media <i>Corrosion Science</i>, V. 48, Is. 9, P. 2676–2688.</p> <p>7. Cheng, Y. F. (2007). Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-neutral pH</p> | <p>1. Антонов В. Г. и др. Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных газопроводов: атлас. М.: Наука, 2006. 105 с.</p> <p>2. Cheng Y. F. Stress corrosion of pipeline. Edited by R. Winston. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2013. 288 p.</p> <p>3. Красовский А. Я., Лохман И. В., Орыняк И. В. Стресс-коррозионные разрушения магистральных трубопроводов. <i>Проблемы прочности</i>. 2012. № 2. С. 23–43.</p> <p>4. Liu Z. Y., Li X. G., Du C. W., Cheng Y. F. Local additional potential model for effect of strain rate on SCC of pipeline steel in an acidic soil solution. <i>Corr. Sci.</i> 2009. Vol. 51, № 12. P. 2863–2871.</p> <p>5. Liu Z. Y., Li X. G., Du C. W., Zhai G. L., Cheng Y. F. Cheng Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment. <i>Corr. Sci.</i> 2008. Vol. 50, № 8. P. 2251–2257.</p> <p>6. Dey S., Mandhyan A. K., Sondhi S. K., Chatteraj I. Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media. <i>Corr. Sci.</i> 2006. Vol. 48, № 9. P. 2676–2688.</p> <p>7. Cheng Y. F. Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-</p> |
|--|--|

- stress corrosion cracking of pipelines. *Electrochimica Acta.*, Vol. 52, Is. 7. P. 2661–2667.
8. Cheng, Y. F., Niu, L. (2007). Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution. *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, Is. 4, P. 558–562.
9. Shipilov, S. A., May, I. L. (2006). Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection. *Eng. Failure Analysis*, Vol. 13, Is. 7, P. 1159–1176.
10. Parkins, R. N., Blanchard, W. K. jr., Delanty, B. S. (1994). Transgranular stress corrosion cracking of high pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH. *Corrosion*, Vol. 50, P. 394–408.
11. Eslami, A., Kania, R., Worthingham, B. et al. (2011). Effect of CO₂ and R-ratio on near-neutral pH stress corrosion cracking initiation under a disbonded coating of pipeline steel. *Corrosion Science*, Vol. 53, P. 2318–2327.
12. Lu, B. T., Luo, J. L., Norton, P. R. et al. (2009). Effects of dissolved hydrogen and elastic and plastic deformation on active dissolution of pipeline steel in anaerobic groundwater of near-neutral pH. *Acta Mater.*, Vol. 57, P. 41–49.
13. Liu, Z. Y., Li, X. G., Cheng, Y. F. (2012). Mechanistic aspect of near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines under cathodic polarization. *Corrosion Science*, Vol. 55, P. 54–60.
14. Fang, B., Atrens, A., Wang, J., Han, E., Zhu, Z., Ke, W. (2003). Review of stress corrosion cracking of pipeline steels in “low” and “high” pH solutions. *Journal of Materials Science*, Vol. 38, P. 127–132.
15. Niu, L., Cheng, Y. F. (2007). Corrosion behavior of X-70 pipe steel in near-neutral pH solution. *Applied surface science*, Vol. 253, Is. 21, P. 8626–8631.
16. de Sena, R. A., Bastos, I. N., Platt, G. M. (2012). Theoretical and Experimental Aspects of the Corrosivity of Simulated Soil Solutions. *International Scholarly Research Notices*. Article ID 103715, 6 pages.
17. Gu, B., Yu, W. Z., Luo, J. L., Mao, X. (1999). Transgranular stress corrosion cracking of X-80 and X-52 pipeline steels in dilute aqueous solution with near-neutral pH. *Corrosion*, Vol. 55, Is. 3, P. 312–318.
18. GOST R 9.915 *Edynaia systema zashchyty ot korrozii y starenia. Metally, splavy, pokrytyia, yzdelyia* [Unified neutral pH stress corrosion cracking of pipelines. *Electrochimica Acta*. 2007. Vol. 52, № 7. P. 2661–2667.
8. Cheng Y. F. and Niu L. Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution. *Electrochemistry Communications*. 2007. Vol. 9, № 4. P. 558–562.
9. Shipilov S. A., May I. L. Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection. *Eng. Failure Analysis*. 2006. Vol. 13, № 7. P. 1159–1176.
10. Parkins R. N., Blanchard W. K. jr., Delanty B. S. Transgranular stress corrosion cracking of high pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH. *Corrosion*. 1994, Vol. 50. P. 394–408.
11. Eslami A., Kania R., Worthingham B. et al. Effect of CO₂ and R-ratio on near-neutral pH stress corrosion cracking initiation under a disbonded coating of pipeline steel. *Corros. Sci*. 2011. Vol. 53. P. 2318–2327.
12. Lu B. T., Luo J. L., Norton P. R. et al. Effects of dissolved hydrogen and elastic and plastic deformation on active dissolution of pipeline steel in anaerobic groundwater of near-neutral pH. *Acta Mater*. 2009. Vol. 57. P. 41–49.
13. Liu Z. Y., Li X. G., Cheng Y. F. Mechanistic aspect of near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines under cathodic polarization. *Corros. Sci*. 2012. Vol. 55. P. 54–60.
14. Fang B. Y., Atrens A., Wang J. Q., Han E. H., Zhu Z. Y., Ke W. Review of stress corrosion cracking of pipeline steels in “low” and “high” pH solutions. *Journal of Material Science*. 2003. No. 38. P. 127–132.
15. Niu L, Cheng Y. F. Corrosion behavior of X-70 pipe steel in near-neutral pH solution. *Applied surface science*. 2007. Vol. 253, Is. 21. P. 8626–8631.
16. de Sena R. A., Bastos I. N., Platt G. M. Theoretical and Experimental Aspects of the Corrosivity of Simulated Soil Solutions. *International Scholarly Research Notices*. 2012. Article ID 103715. 6 p.
17. Gu B., Luo J. L., Mao W. Z., Yu X. *Corrosion*. 1999. Vol. 55, Is. 3. P. 312–318.
18. ГОСТ Р 9.915 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы,

system of corrosion and ageing protection. Metals, alloys, coatings, products. Test methods of hydrogen embrittlement]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 31 p. [in Russian].

19. Nyrkova, L. I., Osadchuk, S. O., Rybakov, A. O., Melnychuk, S. L. (2020). Methodical approach and a criterion for the evaluation of the susceptibility of pipe steel to corrosion cracking. *Materials Science*, Vol. 55, Is. 5, P. 625–632.

покрытия, изделия. Методы испытаний на водородное охрупчивание. Москва. Дата введения 2012-01-01.

19. Nyrkova L. I., Osadchuk S. O., Rybakov A. O., Melnychuk S. L. Methodical approach and a criterion for the evaluation of the susceptibility of pipe steel to corrosion cracking. *Materials Science*. 2020. Vol. 55, Is. 5. P. 625–632.

NYRKOVA LYUDMILA

Doctor of Technical Sciences
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>
Scopus Author ID: 57209672063
Researcher ID: AAF-3187-2020
E-mail: lnyrkova@gmail.com

LISOVYI PAVLO

Post Graduate Student
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7705-9524>
E-mail: Lisovyi.Pavel@gmail.com

GONCHARENKO LARYSA

Junior researcher
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of
Ukraine
<http://orcid.org/0000-0001-8371-2078>
E-mail: larikgon153@gmail.com

OSADCHUK SVETLANA

Candidat of Technical Sciences
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9559-0151>
Scopus Author ID: 55215010000
E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

KLYMENKO ANATOLIY

Candidat of Technical Sciences
Department of welding of oil and gas pipes
E.O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9148-8221>
Scopus Author ID: 57220153661
E-mail: aklimenko@meta.ua

BORYSENKO YULIYA

Candidat of Technical Sciences
Department for electrochemical power
engineering & chemistry
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1639-0205>
Kyiv National University of Technologies and Design
E-mail: boria95@ukr.net

BRATOCHKIN OLEG

Maister of department for electrochemical
power engineering
Kyiv National University of
Technologies and Design Ukraine
E-mail: simplemakinglab@gmail.com

**¹НЫРКОВА Л. И., ¹ЛИСОВОЙ П. Э., ¹ГОНЧАРЕНКО Л. В., ¹ОСАДЧУК С. А.,
¹КЛИМЕНКО А. В., ²БОРИСЕНКО Ю. В., ²БРАТОЧКИН О. В.**

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

²Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ
10Г2ФБ В МОДЕЛЬНОМ ГРУНТОВОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ
ПРИ КАТОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ**

Цель. Исследовать закономерности коррозионного растрескивания стали трубного сортамента 10Г2ФБ в условиях катодной защиты.

Методика. Применяли следующие методы: деформации с малой скоростью, метод растровой электронной микроскопии, электролитического наводороживания, массометрии.

Результаты. Изучены закономерности коррозионного растрескивания трубной стали 10Г2ФБ в модельной почвенной среде NS4 в диапазоне потенциалов от потенциала коррозии до -1,2 В. По результатам комплекса коррозионно-механических, электрохимических и физических исследований установлено, что при смещении потенциала катодной поляризации в ряду -0,75 В → -0,95 В → -1,05 В → -1,2 В коэффициент склонности этой стали к коррозионному растрескиванию K_s соответственно возрастает 1,09 → 1,11 → 1,13 → 1,26. Концентрация водорода, проникающего в сталь при этих потенциалах, изменяется немонотонно: 0 → 0 → 0,057 → 0,018 моль/дм³. Скорость остаточной коррозии при смещении потенциала в ряду $E_{кор}$ → -0,75 В → -0,95 В → -1,05 В уменьшается сначала резко, затем медленно: 0,035 мм/год → 0,005 мм/год → 0,0009 мм/год → 0,0004 мм/год, т.е. при высоких катодных потенциалах приложенная поляризация расходуется на разложение водного электролита с выделением водорода, который проникает в сталь и вызывает хрупкое растрескивание, что подтверждено ростом доли хрупкого разрушения в морфологии изломов образцов.

Научная новизна. Получены новые результаты фундаментальных исследований, касающиеся закономерностей коррозионного растрескивания стали ферритно-перлитного класса трубного сортамента 10Г2ФБ в условиях катодной защиты в диапазоне потенциалов от потенциала коррозии до -1,2 В. Выявлено, что особенностью влияния катодной поляризации в указанном диапазоне потенциалов при оценке склонности к коррозионному растрескиванию по коэффициенту K_s является увеличение относительного сужения и уменьшение относительного удлинения, что в целом указывает на охрупчивание металла под действием коррозионной среды и потенциала. Прочностные характеристики остаются почти на том же уровне. Наибольшая склонность к коррозионному растрескиванию наблюдается при потенциале поляризации -1,0 В и отрицательнее.

Практическое значение. Разработанная методология комплексного исследования закономерностей коррозионного растрескивания использована для исследования стали трубного сортамента 10Г2ФБ в модельной почвенной среде NS4 в условиях, моделирующих условия эксплуатации. Полученные новые данные относительно закономерностей коррозионного растрескивания стали будут полезны для предупреждения коррозионного растрескивания магистральных газопроводов во время эксплуатации.

Ключевые слова: сталь трубного сортамента 10Г2ФБ; метод деформации с малой скоростью; катодный потенциал; электрохимическая коррозия; коррозионное растрескивание.

¹NYRKOVA L. I., ¹LISOVOY P. E., ¹GONCHARENKO L. V., ¹OSADCHUK S.A.,
¹KLIMENKO A. V., ²BORISENKO YU. V., ²BATOCHKIN O. V.

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Kyiv National University of Technology and Design, Ukraine

REGULARITIES OF STRESS CORROSION CRACKING OF 10G2FB PIPELINE STEEL IN NEAR NEUTRAL SOIL ENVIRONMENT AT CATHODIC POLARIZATION

Purpose. Investigate the regularities of corrosion cracking of 10G2FB steel under cathodic protection.

Methodology. The following methods were used: slow strain rate, scanning electron microscopy, electrolytic hydrogenation, mass measurement.

Results. The regularities of corrosion cracking of pipe steel 10G2FB in near neutral soil environment NS4 in the range of potentials from the corrosion potential to -1.2 V were investigated. According to the results of a complex of corrosion-mechanical, electrochemical and physical studies, it was found that with a shift in the cathodic polarization potential in the range of -0,75 V → -0,95 V → -1,05 V → -1,2 V → -0,95 V the coefficient of susceptibility of this steel to stress corrosion cracking K_s increases correspondingly, 1,09 → 1,11 → 1,13 → 1,26. The concentration of hydrogen which penetrating into steel at these potentials changes nonmonotonically: 0 → 0 → 0,057 → 0,018 mol/dm³. The rate of residual corrosion with a potential shift in the series E_{cor} → -0,75 V → -0,95 V → -1,05 V decreases first sharply, then slowly: 0.035 mm/year → 0.005 mm/year → 0.0009 mm/year → 0.0004 mm/year, i.e. at high cathodic potentials, the applied polarization is spent on the decomposition of the aqueous electrolyte with the release of hydrogen, which

penetrates into the steel and causes brittle cracking, which is confirmed by an increasing in the part of brittle fracture in the surface morphology of the specimens.

Scientific originality. New results of fundamental research concerning the regularities of stress-corrosion cracking of ferrite-pearlite class steel of pipe assortment 10G2FB under conditions of cathodic protection in the range of potentials from the corrosion potential to -1.2 V have been obtained. It was revealed that a feature of the effect of cathodic polarization in the indicated range of potentials when assessing the tendency to stress corrosion cracking by the K_s coefficient is an increasing in the relative narrowing and a decrease in the relative elongation, which generally indicates the embrittlement of the metal under the contact with corrosive medium and potential. Strength characteristics remain almost the same. The greatest tendency to stress-corrosion cracking is observed at a polarization potential of -1.0 V or more negative.

Practical value. The developed methodology for a complex study of the regularities of stress-corrosion cracking was used for study of 10G2FB steel of the pipe assortment in a model soil environment NS4 under conditions simulating operating conditions. The new data obtained on the regularities of stress-corrosion cracking of steel will be useful for preventing the stress-corrosion cracking of main gas pipelines during operation.

Keywords: pipeline assortment steel 10G2FB; slow strain rate method; scanning electron microscopy; cathodic potential; electrochemical corrosion; stress-corrosion cracking.

УДК 535-7

ЯЦЕНКО А. С., ОЛЕЙНИКОВА І. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

**ВИКОРИСТАННЯ ОПТОВОЛОКНА ЯК СКЛАДОВОЇ
ЗАГАЛЬНОГО ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ ДЛЯ
СТВОРЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО РІВНЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**

Мета. Розробити нову систему освітлення спортивних дитячих комплексів. Запровадження розробленої технології дозволить покращити стан освітленості вуличних спортивних майданчиків без створення світлового забруднення та збільшення додаткових енергоефективних витрат.

Методика. Комбінована методика технології використання двох типів джерел світла, а саме: малопотужних світлодіодних прожекторів та оптоволокна з єдиним джерелом світла дозволяє створити енергоефективну систему освітлення полів. Запропоноване рішення може бути використано для повного освітлення вуличних дитячих комплексів. Підбір параметрів системи освітлення здійснювався на прикладі реального спортивно-дитячого комплексу.

Результати. Виконані вимірювання реальних параметрів існуючого спортивного майданчика та врахування його геометрії дозволило нас розрахувати світлові параметри джерел світла, підібрати відповідні матеріали та створити повну модель освітлення. Розроблена нова технологія освітлення спортивно-дитячих комплексів, покращено рівень освітлення спортивних споруд без створення світлового забруднення.

Наукова новизна. Вперше було запропоновано комбіновану технологію освітлення спортивно-дитячих майданчиків з допомогою використовуючи оптоволокна та світлодіодних прожекторів. Запровадження розробленої технології дозволить покращити стан освітленості подібних споруд без створення зайвого світлового навантаження на мешканців, що знаходяться поруч з майданчиком. При цьому таке освітлення не призведе до збільшення додаткових енергетичних витрат.

Практична значимість. На сьогоднішній момент більшість вуличних спортивно-розважальних майданчиків позбавлені будь-якого освітлення. Запропоноване комплексне рішення може бути прилаштовано до будь-якої вже існуючої системи освітлення полів. Вона є найбільш ефективною та електрично безпечною оскільки оптоволокно проводить не електричний струм, а світло. Саме джерело світла може бути розташовано віддалено в захищеному від вандалів місці.

Ключові слова: спортивні майданчики; спорт; вуличне освітлення; оптоволокно; світлодіодні джерела світла; стадіон.

Вступ. В системі зовнішнього освітлення економія електроенергії у більшості випадків досягається шляхом зменшення кількості освітлювальних приладів, а не покращення їх енергоефективності. В багатьох випадках зони фізичної активності та відпочинку дітей та молоді залишаються не освітленими, що негативно впливає на здоров'я нації. Але з іншого боку надмірна освітленість деяких місцевостей негативно впливає на психіку людей та створює світлове забруднення навколишнього середовища.

Нині доведено, що використання оптоволокна дає можливість забезпечити уникнення фізичних пошкоджень вразі несподіваного відказу. Оптоволокно завдяки своїм фізичним властивостям дозволяє розмістити на великій відстані джерело світла до якого можливо під'єднати більше ніж одне оптичне волокно. Це у свою чергу дозволяє забезпечити захист від крадіжок та створення розгалуженої мережі освітлення. Більш того пошкодження одного з елементів оптоволокна не впливає на режим роботи інших складових систем освітлення.

Постановка завдання. Мета роботи – розробити нову систему освітлення спортивного дитячого комплексів використовуючи технологію поєднання оптоволокна та світлодіодних джерел світла, адже на сьогоднішній момент більшість вуличних спортивно-розважальних

майданчиків не освітлюються. Запровадження розробленої технології дозволить створити двокомпонентну систему освітлення вуличних спортивних споруд. Комбінація систем оптоволоконного та LED освітлення не призведе до збільшення енерговитрат, а спеціальне розташування джерел світла не буде створювати додаткового світлового забруднення.

Результати досліджень. Для дослідження було обрано конкретний об'єкт – дитячий-спортивний комплекс, який розташований на бульварі Лесі Українки 27. Цей комплекс містить в собі елементи футбольного та баскетбольних полів. Спостереження показали що освітленість цього комплексу у вечірній період доби відсутня. Навіть за таких умов це поле використовується для гри ввечері. Цим самим створюються небезпечні умови експлуатації та негативний вплив на психічний та фізичний стан дітей.

Проведений аналіз оздоблення даного майданчика дозволив запропонувати для освітлення такого поля використання оптоволоконної системи. Вона включає в себе: джерело світла, оптоволоконні кабелі бокового та торцевого світіння.

В якості оптоволоконна була обрана марка українського бренду Південне місто. Кабель бокового світіння Solidcore вже використовується для підсвічування периметру басейнів і фонтанів; підсвічування ніш або карнизів у інтер'єрному, ландшафтному та архітектурному дизайні. Економічність, простота обслуговування і монтажу, точна передача кольорової температури – незаперечні переваги перед традиційними видами підсвічування. Оптоволоконно може служити заміною неонових трубок в освітленні рекламних вивісок та вітрин.

Розглянемо докладніше принцип за яким оптоволоконно може проводити світло. Оптоволоконно це система, яка складається з двох трубок та Серцевини, що розташована вздовж осі оптоволоконна (рис. 1). Принцип роботи побудований на фізичному явищі повного внутрішнього відбиття. Світло, потрапляючи в середину оптоволоконна, після багатьох відбивань не виходить за межі оболонки та передається вздовж неї. Таким чином потік світла без змін виходить з іншого торця оптоволоконна. В разі бічного світіння можливо отримати повністю освітлене оптоволоконно [1].

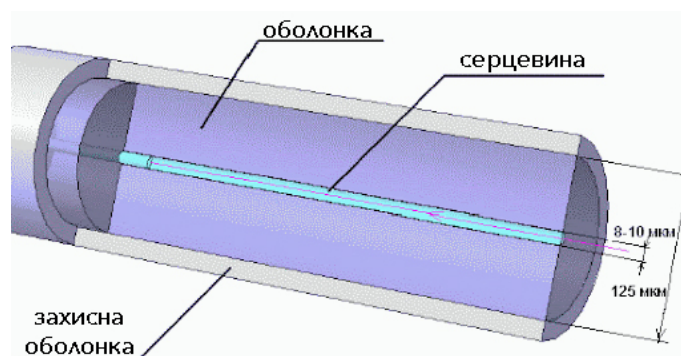


Рис. 1. Будова оптоволоконна

На сьогоднішній день технологія оптоволоконної системи набула широкого поширення, її стали використовувати не лише в якості декору а й з функціональної точки зору. Оптичне волокно починають використовувати в освітленні музеїв, лікарень, житлових приміщень, офісних будівель та підземних приміщень [2–6]. При певних умовах оптоволоконно стає єдиним рішенням освітлення, як, наприклад в басейнах, фонтанах та інших архітектурних спорудах з водою.

Зараз вже існують норми для освітлення професійних футбольних полів, які ураховують при проектуванні багато різних факторів в тому числі наявність камер та великої кількості глядачів. При цьому варто урахувати, що середня швидкість професійного гравця більша ніж у звичайної дитини. Тобто інтенсивність гри жвавіша, цеу свою чергу призводить

до збільшення зорової роботи всіх учасників матчу, та створює потребу у якісних світильниках з гарною кольоровою передачею.

Існують три системи професійного освітлення полів: система чотирьох щогл, система шести/восьми та лінійна система.

Система чотирьох щогл розповсюджена в нашій країні так і за кордоном (рис. 2). З допомогою цієї системи стадіони освітлюють прожекторами які встановлюються на чотирьох високих щоглах, розташованих в кутах поля, позаду розмітки. Цю систему використовують з метою, щоб воротар зміг побачити м'яч перед воротами, а не силует, тобто створює достатньо об'ємно освітлення. Прожектори цієї системи освітлення спрямовані на все поле і створюють, необхідний рівень освітлення в горизонтальній та вертикальній площині, освітлення проходить через повздовжню вісь поля. При такому направленні прожектори створюється задовільна рівномірність освітлення в межах поля. Висота установки прожекторів розраховується залежно від відстані між щоглами та подовжньою віссю поля.

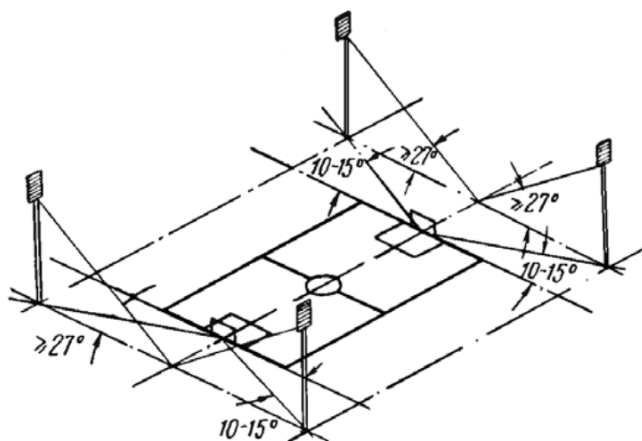


Рис. 2. Розташування освітлення у системі чотирьох щогл

Основи щогл повинні розміщатися за межами розмітки поля настільки, щоб кут між самою щоглою, центром воріт та розміткою поля складав 15° . При наявності трибун для вболівальників прожекторні щогли рекомендовано розміщувати позаду або зверху трибуни. Перевагою цієї технології освітлення являється її низька вартість у порівнянні з іншими системами. Це зумовлено меншим числом щогл, ціна яких складає ключову частину загальної вартості.

Основним недоліком характерним для цієї системи являється утворення трьох тіней пов'язаних з обмеженим числом джерел світла. Система чотирьох щогл не є доцільною для освітлення великих стадіонів, але для маленьких полів вона є універсальною.

Це обумовлено тим, що для освітлення маленького простору потребує багато освітлювальних приладів, які важко розмістити на чотирьох щоглах.

У випадках освітлення великого простору краще використовувати систему шести/восьми щогл (рис. 3), які встановлені уздовж бічних сторін поля. Така система має кращі тіньотворюючі властивості, оскільки кількість прожекторних батарей зростає і тіні від гравців стають м'якшими.

Однак слід зазначити, що для цієї системи вища ніж при чотирьох щоглах, в наслідок великої кількості світильників в полі зору гравця. При створенні освітлення великих полів за цією системою достатньо легко збільшити рівень освітленості просто збільшити кількість прожекторів. Щогли у цій системі можуть бути тонкі та легкі опори, встановлених близько до розмітки поля та розміщатись нижче ніж в інших системах. При цьому вигідність цієї системи полягає в запобіганні створення провалів освітлення та сірих зон на території спортивного поля.

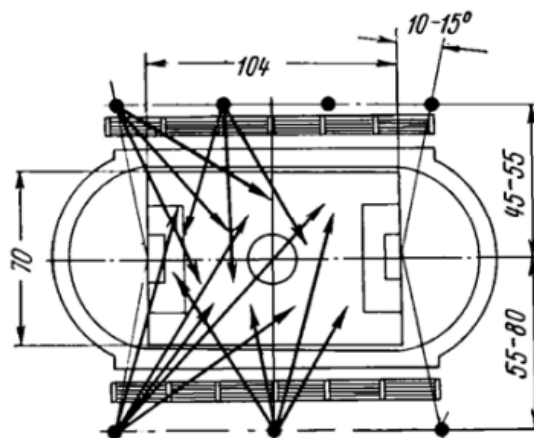


Рис. 3. Система шести/восьми щогл

Другою системою яка пропонується для освітлення малих стадіонів є лінійна система освітлення (рис. 4). Для освітлення стадіонів великої прощі з врахуванням трибун прожектори встановлюють з двох бічних сторін поля. Ця система має вигляд суцільної або переривчастої лінії. В такому випадку пристворені освітлення необхідно щоб край джерела світла знаходився за лінією воріт для створення об'ємного зображення в межах всього поля. Для малих площ доцільно замінити прожектори на більш енергоефективні світлодіодні стрічки або взагалі на оптоволоконні системи. Перевагою цієї системи являється створення рівномірності освітлення поля, гравці та глядачі відчують комфортні умови, що створюються на стадіоні при вживанні освітлення за цією системою. Значним недоліком цієї системи для освітлення великих полів являється велика протяжність щогл освітлення, що займають значну частину поля зору практично при будь-якому положенні гравців на полі. Але ця проблема вирішується при застосуванні її на маленькі стадіони. Прожектори створюють підвищену сліпучу дію на гравців, що призводить до так званого ефекту «зникнення м'яча», тобто коли траєкторія м'яча йде вище лінії освітлення і він абсолютно зникає з поля зору [7].

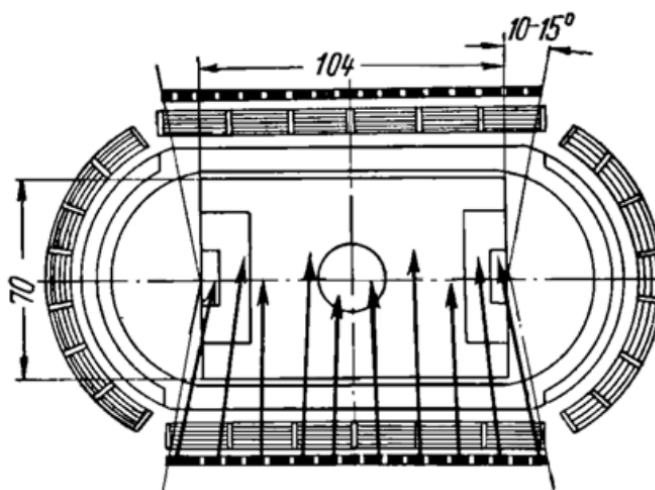


Рис. 4. Лінійна система освітлення стадіонів

Для адаптації норм освітлення професійних стадіонів для створення спортивно-дитячих комплексів було зроблено такі зміни: спрощення інтенсивності світлового потоку, зменшення вартості світильників, шляхом використання дешевших технологій.

Оскільки обраний спортивний майданчик має захисний паркан, для створення освітлення була обрана система чотирьох щогл. Тобто світильники будуть розміщатись в кутах поля і розміщатись на паркані самого майданчика. Допоміжним освітленням буде слугувати оптоволокно розміщене по периметру майданчика. За нормами ДБН В.2.5-28:2018 освітлення спортивного майданчика має бути не менше 50 ЛК [8].

Через те, що основні світильники будуть розміщені по кутах на паркані, рекомендовано зробити їх з урахуванням можливості зарядки від сонячних панелей. Адаптація розміщення сонячних систем на даху будівлі не потребує ніяких нотаріальних дозволів. Великою перевагою сонячних панелей є можливість використання їх у якості резервного джерела живлення. Потрібно тільки під'єднати акумулятор [9].

Оптоволокно завдяки своїм властивостям являється універсальним додатковим освітленням, адже воно не створює пульсацію, точно передає кольоровий спектр джерела світла, не нагрівається та має достатньо тривалий термін використання.

Джерело світла для оптоволокна являється LED через свою довгу тривалість роботи та стійкість до зміни температур. Розрахунки показали, що для освітлення даного майданчика можна використати LED проєктор на 16W. З кольоровою температурою в 600K, що достатньо при створенні комфортних зорових для дітей на майданчику. Однак індустрія розвивається, і на ринок виходить інноваційна технологія OLED [10], яка у порівнянні з іншими системами не вимагають фонового підсвічування, тому вони можуть відображати глибокі чорні кольори, використавши набагато менше енергії [11]. Також варто не виключати можливість використання лазерів, які останнім часом стали більш доступними для придбання. Переваги їх з точки зору інтенсивності не підлягають сумніву.

Для створення освітлення вже існуючого поля були поєднані дві системи освітлення чотирьох щогл та лінійна. В якостях щогл використовується вже існуючий паркан, висота якого дозволяє розмістити невеличкі прожектори при цьому не порушуючи норми освітлення полів. Як джерела світла були обрані світлодіодні прожектори, які мають низьку вартість, легкі у монтажуванні та експлуатаційні, а також можуть бути замінені на прожектори з сонячною панеллю (рис. 5).



Рис. 5. Запропонована візуалізація освітлення

Лінійне освітлення було створено з допомогою використання як торцевого, так і бічного оптоволокна для створення задовільненого рівня освітленості.

Висновки. Розроблена система освітлення спортивного дитячого комплексів використовуючи технологію оптоволокна та світлодіодних джерел світла. Проведені дослідження проходження декількох видів світлових хвиль від різних за природою джерел світла через оптоволокно діаметр якого знаходиться в певному діапазоні. Виявлено що інтенсивність світіння по всій довжині оптоволокна є рівномірною, яскравість та кольорова

температура джерела світла залишається без змін при проходженні оптоволоконном. Запропонована методика освітлення спортивних майданчиків дозволить розв'язати питання фізичного виховання молоді оскільки збільшить час експлуатації стадіонів в темну пору доби. Розроблена система є найбільш енергоефективною та екологічною безпечною з урахуванням розміщення поля біля житлових будинків.

References

1. Charles Uzoanya Ndujiuba, Samuel Ndueso John, Kayode Onasoga (2014). Optic Fibericity – The New Era Lighting. *International Journal of Energy Engineering*. 2014. P. 71.
2. Chong, K. K. and Wong, C. W. (2009). General formula for on-axis sun tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector. *Solar Energy*, Vol. 83, No. 3, P. 298–305.
3. Couture, P., Nabbus, H., Al-Azzawi, A., Havelock, M. (2011). Improving passive solar collector for fiber optic lighting. In: *Proceedings of the IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC '11)*, P. 68–73.
4. Gude, V. G., Nirmalakhandan, N., Deng, S., Maganti, A. (2014). Low temperature desalination using solar collectors augmented by thermal energy storage. *Applied Energy*, Vol. 91, No. 1, P. 466–474.
5. Xue, X., Zheng, H., Su, Y., Kang, H. (2011). Study of a novel sunlight concentrating and optical fibre guiding system. *Solar Energy*, Vol. 85, No. 7, P. 1364–1370.
6. Ullah, I. and Shin, S. (2014). Highly concentrated optical fiber-based daylighting systems for multi-floor office buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 72, P. 246–261.
7. Lyashenko, O. M., Vasylyeva, Yu. O. (2015). Metodichni vkazivky do praktychnykh znan i samostiynoyi roboty z dystsypliny [Methodical instructions to practical knowledge and independent work on discipline]. *Kompyuterne proektuvannya osviltennya sportyvnykh sporud = Computer-aided design of sports facilities lighting*, Kharkiv, P. 7–10 [in Ukrainian].
8. ДБН В.25.5-28:2018. Pryrodne i shtuchne osviltennia [Natural and artificial lighting]. P. 79 [in Ukrainian].
9. Boldyrev, A. A., Komar, V. O. Dotsilnist vykorystannia soniachnykh panelei perevahy ta nedoliky [The feasibility of using solar panels advantages and disadvantages]. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/28772/8993.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [in Ukrainian].
10. Vasyliiev, O. OLED: zatyshshia pered ryvkom? [OLED: calm before the jerk?]. URL: <https://www.elec.ru/articles/oled-zatishe-pered-ryvkom/> [in Ukrainian].

Література

1. Charles Uzoanya Ndujiuba, Samuel Ndueso John, Kayode Onasoga. Optic Fibericity – The New Era Lighting. *International Journal of Energy Engineering*. 2014. P. 71.
2. Chong K. K. and Wong C. W. General formula for on-axis sun tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector. *Solar Energy*. 2009. Vol. 83, No. 3. P. 298–305.
3. Couture P., Nabbus H., Al-Azzawi A., Havelock M. Improving passive solar collector for fiber optic lighting. In: *Proceedings of the IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC '11)*. 2011. P. 68–73.
4. Gude V. G., Nirmalakhandan N., Deng S., Maganti A. Low temperature desalination using solar collectors augmented by thermal energy storage. *Applied Energy*. 2014. Vol. 91, No. 1. P. 466–474.
5. Xue X., Zheng H., Su Y., Kang H. Study of a novel sunlight concentrating and optical fibre guiding system. *Solar Energy*. 2011. Vol. 85, No. 7. P. 1364–1370.
6. Ullah I. and Shin S. Highly concentrated optical fiber-based daylighting systems for multi-floor office buildings. *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 72. P. 246–261.
7. Ляшенко О. М., Васильєва Ю. О. Методичні вказівки до практичних знань і самостійної роботи з дисципліни. *Комп'ютерне проектування освітлення спортивних споруд*. Харків, 2015. С. 7–10.
8. ДБН В.25.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. С. 79.
9. Болдирев А. А., Комар В. О. Доцільність використання сонячних панелей переваги та недоліки. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/28772/8993.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
10. Васильєв О. OLED: затишшя перед ривком? URL: <https://www.elec.ru/articles/oled-zatishe-pered-ryvkom/>

11. Ivanova, M., Oleinikova, I., Zaika, N., Slitiuk, O. (2021). Vykorystannia oled tekhnolohii u dyzaini [Use of oled technology in design]. Aktualni problemy suchasnoho dyzainu = Current issues of modern design, P. 158–159 [in Ukrainian].

11. Іванова М., Олейнікова І., Заїка Н., Слітюк О. Використання oled технологій у дизайні. Актуальні проблеми сучасного дизайну. 2021. С. 158–159.

YATSENKO ALINA

Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1422-3796>
e-mail: atsenkoalina@gmail.com

OLEINIKOVA IRYNA

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,
Department of Applied Physics and Higher Mathematics,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1756-5203>
Scopus Author ID: 57191975872
E-mail: olejnikova.iv@knuvd.com.ua

ЯЦЕНКО А. С., ОЛЕЙНИКОВА И. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТОВОЛОКНА КАК СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОБЩЕГО ВНЕШНЕГО ОСВЕЩЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Цель. Разработать новую систему освещения спортивных детских комплексов. Введение разработанной технологии позволит улучшить состояние освещенности уличных спортивных площадок без создания светового загрязнения и увеличения дополнительных энергоэффективных расходов.

Методика. Комбинированная методика технологии использования двух типов источников света, а именно: маломощных светодиодных прожекторов и оптоволокну с единственным источником света позволяет создать энергоэффективную систему освещения полей. Предложенное решение может быть использовано для полного освещения уличных детских комплексов. Подбор параметров системы освещения осуществлялся на примере реального спортивно-детского комплекса.

Результаты. Выполненные измерения реальных параметров существующей спортивной площадки и учета его геометрии позволило нам рассчитать световые параметры источников света, подобрать соответствующие материалы и создать полную модель освещения. Разработана новая технология освещения спортивно-детских комплексов, улучшен уровень освещения спортивных сооружений без создания светового загрязнения.

Научная новизна. Впервые было предложено комбинированную технологию освещения спортивно-детских площадок с помощью использования оптоволокну и светодиодных прожекторов. Введение разработанной технологии позволит улучшить состояние освещенности подобных сооружений без создания лишней световой нагрузки на жителей, находящихся рядом с площадкой. При этом такое освещение не приведет к увеличению дополнительных энергетических затрат.

Практическая значимость. На сегодняшний момент большинство уличных спортивно-развлекательных площадок лишены всякого освещения. Предложенное комплексное решение может использоваться в любой уже существующей системе освещения полей. Она является наиболее эффективной и электрически безопасной поскольку оптоволокну проводит не электрический ток, а свет. Сам источник света может быть расположен удаленно в защищенном от вандалов месте.

Ключевые слова: спортивные площадки; спорт; уличное освещение; оптоволокну; светодиодные источники света; стадион.

YATSENKO A. S., OLENIKOVA I. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**USING OPTIC FIBER AS PART OF GENERAL AMBIENT LIGHTING
TO MAXIMIZE ENERGY EFFICIENCY**

Purpose. To develop a new lighting system for children's sports complexes. The introduction of the developed technology will improve the state of illumination of outdoor sports grounds without creating light pollution and increasing additional energy-efficient costs.

Methodology. The combined technique of the technology of using two types of light sources, namely: low-power LED floodlights and optical fiber with a single light source, allows you to create an energy-efficient field illumination system. The proposed solution can be used for full illumination of street children's complexes. The selection of the parameters of the lighting system was carried out on the example of a real sports and children's complex.

Findings. The performed measurements of the real parameters of the existing sports ground and taking into account its geometry allowed us to calculate the light parameters of light sources, select the appropriate materials and create a complete lighting model. A new lighting technology for sports and children's complexes has been developed, the level of lighting of sports facilities has been improved without creating light pollution.

Originality. For the first time, a combined technology of illumination of sports and children's playgrounds was proposed using optical fiber and LED floodlights. The introduction of the developed technology will improve the state of illumination of such structures without creating an unnecessary light load on residents who are near the site. Moreover, such lighting will not lead to an increase in additional energy costs.

Practical value. Today, most outdoor sports and entertainment venues are devoid of any lighting. The proposed complex solution can be used in any existing field lighting system. It is the most efficient and electrically safe because the optical fiber does not conduct electricity, but light. The light source itself can be located remotely and protected from vandals.

Keywords: sports grounds; sports; street lighting; fiber optic; LED light sources; stadium.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.2.5>

УДК 544.653.1:
661.8...2

¹КУДЕЛКО К. О., ¹РОЖДЕСТВЕНСЬКА Л. М.,
²БОРИСЕНКО Ю. В., ²МІХНЮК А. О., ²БАРСУКОВ В. З.

¹Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського, Київ, Україна

²Київський національний університет технологій і дизайну, Україна

ФОРМУВАННЯ ТА ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ ПОРИСТОГО АНОДОВАНОГО ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ, СИНТЕЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОХІМІЧНО У ПРИСУТНОСТІ ОКИСЛЕНОГО ГРАФЕНУ

Мета дослідження: Встановлення впливу добавки вуглецевого нанорозмірного модифікатора оксиду графену на формування пористої анодної плівки під час електрохімічного окислення у щавлевому електроліті.

Методи дослідження: UV-VIS спектри суспензії оксиду графену отримували використовуючи спектрофотометр, встановлення термогравіметричних характеристик проводили за допомогою термоаналізатора, встановлення порових характеристик окисленого оксиду алюмінію проводили методом низькотемпературної сорбції-десорбції азоту, морфологію і структуру та склад поверхні встановлювали з використанням електронного мікроскопа.

Результати: Показана можливість використання нанорозмірних вуглецевих матеріалів в електрохімічних електролітах під час анодування алюмінію. Отримані електронні мікрофотографії анодованих плівок вказують на вплив введеного вуглецевого модифікатора (оксиду графену) на морфологію отриманого оксиду. Результатом процесу є формування структурної сотової плівки анодованого оксиду з порами меншого розміру, в порівнянні з синтезом у аналогічному електроліті без модифікатора.

Показано, що введення оксиду графену (0,25%) у щавлевокислий електроліт (0,3М) впливає на стабільність процесу анодування, визначена питома поверхня зразка анодованого алюмінію синтезованого з оксидом графену і становить 35,5 м²/г, що у три рази більше ніж без вуглецевого модифікатора. Згідно сорбційно-порових досліджень, констатується, що наявність нанорозмірного оксиду графену у електроліті, призводить до зменшення радіусу пор АОА і становить 22 нм, при цьому зростає загальний об'єм мікропор. Отриманні результати дозволяють зробити висновок про перспективність використання модифікатора оксиду графену для отримання матриць анодованого оксиду алюмінію. В подальшому дані матриці можуть бути використані для розділення розчинів та газів.

Висновки: Введення оксиду графену у щавлевий електроліт впливає на формування пористого анодованого оксиду алюмінію, показана можливість регулювання процесу утворення пористої плівки завдяки оксиду графену в електроліті. Можливо корелювати час формування плівки анодного шару.

Ключові слова: анодований оксид алюмінію; оксид графену; щавлева кислота; електрохімічний синтез.

Вступ. Однією з важливих сфер використання оксидів багатовалентних металів є сорбційні процеси: амфотерні оксиди являють собою практично єдиний клас неорганічних сорбентів, що мають аніонообмінні властивості [1, 2]. Гідратовані оксиди застосовують також для виготовлення дисперсних композитів, які містять, наприклад, новітні вуглецеві наноматеріали [3, 4]. Функція останніх – розширення інтервалу рН сорбції катіонів. Оксидні сполуки використовують й для модифікування іонообмінних смол [5, 6] (для посилення їх селективності щодо токсичних аніонів, таких як As(V) [5] та U(VI)-вмісних [6]) та протонпровідних мембран [7] (для розширення температурного інтервалу експлуатації низькотемпературних паливних елементів). Відомі роботи, де гідратовані оксиди слугували модифікаторами керамічних мембран [8–10] з метою надання їм зарядової селективності. Більш того, кристалічні модифікації оксидів являють собою основу таких мембран [10].

До амфотерних модифікацій відносяться й плівки анодно окисованого (анодованого) алюмінію (АОА) – відомі неорганічні структуровані пористі матеріали, які отримують електрохімічним окисленням поверхні алюмінію в сірчаній, щавлевій, фосфорній кислотах без подальшої термообробки [11]. Традиційні сфери застосування АОА – матриці для формування вуглецевих нанотрубок а також покриття на поверхні алюмінію для надання йому шорсткості, що забезпечує стійкість нанесеної фарби та захист від корозії. Розробка нанопористих анодованих матеріалів є цікавою з точки зору отримання мембран для видалення токсичних та цінних компонентів з рідин. АОА притаманна однорідність пор, для яких характерною є гексагональна сотова структура. Це вигідно відрізняє ці матеріали від традиційних керамічних мембран, отриманих при спіканні шихти при високому тиску (така кераміка характеризується неоднорідною пористою структурою). Також перевагою електрохімічного способу синтезу АОА є те, що змінюючи умови синтезу (напругу, густину струму, склад розчину електроліту, температуру) можна керувати розмірними характеристиками та товщиною пористої плівки.

Недоліком електрохімічного методу одержання АОА мембран є те, що анодне окислювання необхідно проводити при постійному охолодженні електроліту до 0–5° С. При перебігу анодування алюмінію, відбувається джоулеве розігрівання електроду і, відповідно, електроліту на дні пор. Наслідком цього є зростання струму, що спричинює інтенсифікацію розчинення металу з наступним осадженням аморфного оксиду алюмінію – в результаті утворюються великі пори (>100 нм) [12]. Рішенням проблеми може бути додавання до електроліту добавки, включення якої до окисної плівки збільшує її теплоємність та зменшує теплопровідність. Для АОА, отриманого у щавлевій кислоті (за eco-friendly умов), питома теплоємність при 400° С досягає 1000 Дж/(кг·К) [13]. При 25 ° С ця величина становить (Дж/(кг·К)): 770 (α - Al_2O_3), 1170 ($\text{Al}(\text{OH})_3$), 4179 (вода). Теплопровідність за цих умов (Вт/(м К)): 1.07 та 1.32 $\text{Вт м}^{-1}\text{К}^{-1}$ для АОА, одержаного у сірчаній та щавлевій кислотах відповідно [14], 0.06 для води. Таким чином, частинки добавки мають утримувати воду. Іншою вимогою є нанорозмірність, оскільки порядок величини товщини стінок пор – 10 нм.

Таким критеріям задовольняє сучасний вуглецевий наноматеріал – окислений графен (ГО), який демонструє супергідрофільні властивості аналогічно іонообмінним полімерам [15]. Супергідрофільність виявляється у сильнішому набряканні у воді, ніж в ідеально змочуючій рідині – октані. Теплові характеристики відновленого графену, який не містить функціональних груп, розраховують теоретично: так, теплопровідність одношарового графену становить від 1500 до 5800 $\text{Вт м}^{-1}\text{К}^{-1}$ в залежності від напрямку теплопереносу [16]. Розрахунки для ГО дають величини, менші у 100 разів [17]. Для гідратованого ГО відомості щодо теплових характеристик у літературі відсутні, проте слід очікувати значно менших величин, ніж для негідратованого матеріалу.

Метою роботи було дослідити залежність впливу добавки ГО до щавлевокислого електроліту на склад та пористу структуру утвореного АОА. Завдання роботи полягали у синтезі АОА з технічно чистого алюмінію у присутності та за відсутності ГО, дослідженні складу та морфології отриманих мембран та їх порівняльному аналізі.

Методи і матеріали. Суспендований графен був отриманий методом окислення графіту аналогічно [18]. За допомогою спектрофотометру Shimadzu UV-mini 1240 UV-VIS досліджували колоїдний розчин ГО у дистильованій воді, який утворювався після відстоювання суспензії (її отримували ультразвуковою активацією при 30 кГц). Гравіметричним аналізом було встановлено кількість твердих часток у суспензії ГО, для цього 1 мл суспензії випарювали, далі сухий залишок зважували на аналітичних вагах і знаходили масу частинок ГО. Суспензію додавали до 0.3 М розчину $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ у такій кількості, щоб вміст вуглецевої добавки становив 0,25%.

В якості вихідного матеріалу для анодування використовували фольгу технічно чистого алюмінію товщиною 0,1 мм. Склад матеріалу, який встановленою спектральним аналізом, є

таким: Al – 99,97%, Fe – 0,01 %, Si – 0,01%, Mg – 0,01%). Попередньо зразок металу розміром 45 мм×45 мм прожарювали при 500° С протягом 60 хв. Відпалені пластини обробляли ультразвуком, знежирювали етанолом далі на одну сторону фольги наносили маску фоторезиста RISTON яка містила круглі отвори діаметром 1 см, далі фоторезист засвічували УФ опроміненням. Потім обробляли поверхню алюмінієвої фольги зв сторони маски з отворами: проводили хімічне полірування 2,5 М розчином NaOH протягом 3 хв., далі – 1 М розчином HCl з подальшим промиванням дистильованою водою.

Експериментальна установка (без електричного обладнання) зображена на рис. 1. Модуль являв собою комірку з двома відділеннями, охолоджуючий контур, джерело струму Б 7-49, вольтметр універсальний В-5-21 та амперметр цифровий ЦЦ-34.

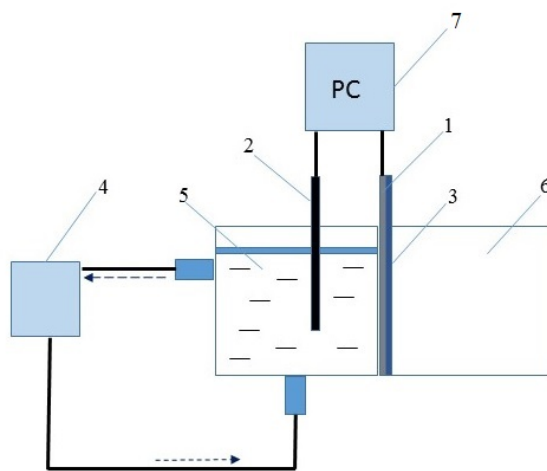


Рис. 1. Електрохімічний синтез АОА: 1 – алюмінієва фольга, 2 – катод, 3 – маска фоторезиста, 4 – охолоджуючий контур, 5 – електроліт, 6 – відділення для травлення, 7 – джерело струму

Підготовлену пластину встановлювали у двокамерній електрохімічній комірці таким чином, щоб вона розділяла відділення (рис 1). Як катод використовували платинову пластину, а як електроліт – 0,3 М розчин $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ без або з добавкою ГО. Електроліт заповнював лише одне відділення, а друге залишалося порожнім. Сторона аноду, вкрита маскою з отворами, знаходилася у контакті з розчином. Температуру в електрохімічному відділенні підтримували на рівні 10° С за допомогою охолоджуючого водного контуру, час анодування залежав від бажаної товщини плівки АОА. Для отримання зразку АОА електрохімічне окислення проводили двостадійно [19] у потенціостатичному режимі при напрузі 40 В, в якості електроліту використовували розчин щавлевої кислоти без вуглецевої добавки. Перша стадія анодування тривала 2 год., потім окислений «жертвний» шар стравлювали сумішшю 1,8% $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$ та 6% H_3PO_4 при 60° С протягом 1 год. Другу стадію анодування проводили аналогічно умовам першої стадії. Для одержання зразку АОА/ГО використовували суспензію ГО в щавлевокислом розчині, анодування проводили в одну стадію при напрузі 40 В без видалення «жертвного» шару. На наступному етапі залишки алюмінію зі сторони, зворотній напрям анодування, у обох зразках стравлювали двокомпонентним розчином $\text{H}_2[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_2\text{Cl}_4]$ (3,4% CuCl_2 у концентрованій соляній кислоті). Для отримання наскрізної пористості надалі проводили видалення бар'єрного шару АОА з дна нанопор у розчині 0,5 H_3PO_4 протягом 40 хв.

Тривалість анодування (t) становила 9 годин і була розрахована теоретично для отримання АОА з товщиною плівки (h) 50 мкм згідно закону Фарадея, приймаючи, що вихід за струмом (η) становить 100% [11, 19]:

$$t = \frac{h M_{\text{Al}_2\text{O}_3} d_{\text{Al}}}{z F d_{\text{Al}_2\text{O}_3} j \eta}, \quad (1)$$

де $M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – молекулярна маса оксиду алюмінію;

M_{Al} – атомна маса алюмінію;

d_{Al} і $d_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – густина алюмінію (2,7 г/см³) та пористого оксиду алюмінію (3,2 г/см³), відповідно;

j – густина струму (мА/см²);

z – заряд алюмінію;

F – стала Фарадея.

Суспензію ГО аналізували спектрофотометричним методом за допомогою прилада Shimadzu-mini (Shimadzu, Японія). Проводили термогравіметричний аналіз отриманих плівок за допомогою дериватографа системи F. Paulic, G. Paulic, L. Erdey (MOM, Угорщина) в атмосфері повітря. Зразки попередньо подрібнювали. Швидкість нагріву становила 10°/хв до температури 600° С. Порометричні дослідження здійснювали методом адсорбції-десорбції азоту з використанням аналізатору Quantochrome Corp., NOVA 2200 E (Quantochrome, США). Дослідження морфології та елементного складу проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопу Tescan Mira 3LMU з детектором InBeam (TESCAN, Чехія). Попередньо зразки фіксували на двосторонній клейкій стрічці, яку закріплювали на скляній підкладці (стрічка відповідала вимогам для роботи у вакуумі, тобто за цих умов не відбувалося виділення газів). На поверхню зразка наносили ультратонкий шар золота за допомогою прилада препарування Gatan peds 682 (Gatan, Inc., США). Час створення вакууму становив 15 хв. Для отримання чітких зображень використовували фокусування та компенсацію астигматизму.

Результати дослідження. Спектрофотометричне дослідження відстояної суспензії ГО, яка використана у роботі, показало, що в УФ області реєструється 2 максимуми поглинання – при 223 та 276 нм (рис. 2). Згідно [20, 21], пік 223 нм відповідає $\pi \rightarrow \pi^*$ переходу для зв'язку С-С. Також знайдено плече близько 276 нм, що пояснюється переходом $n \rightarrow \pi^*$, яке характерне для карбоксильних груп. Таким чином можна підтвердити присутність колоїдних частинок ГО у відстояній суспензії.

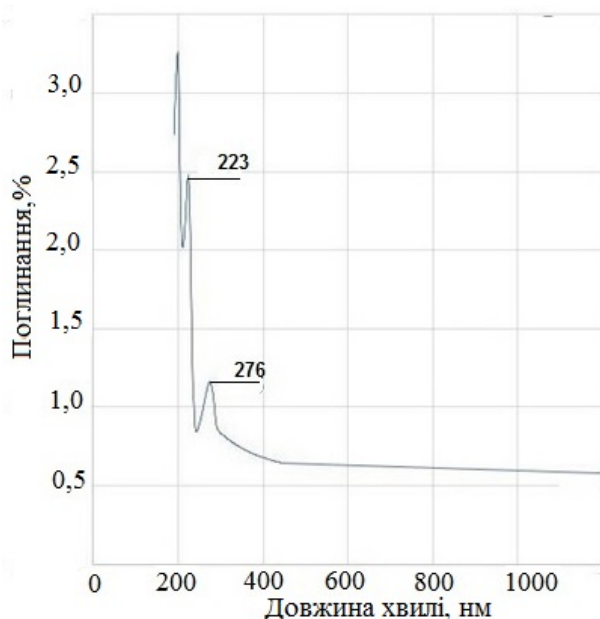
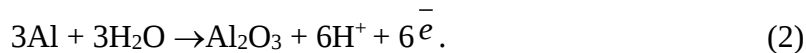


Рис. 2. Електронний спектр колоїдного розчину ГО у дистильованій воді

Порівняння низькороздільних СЕМ мікрофотографій, отриманих для зразків АОА та АОА/ГО дозволяє зробити висновок, що введення до електроліту вуглецевої добавки сприяє утворенню однорідної поверхні оксиду на мікрорівні (рис. 3). На поверхні зразку АОА є помітними западини розміром до 1 мкм та менші опуклості. Западини виникають внаслідок вигорання домішок, а опуклості є результатом адгезії частинок розмір яких – порядку 100 нм. Частинки утворюються при електрохімічному (анодування) розчиненні алюмінію з подальшим перетворенням в оксид [11]:



При травленні алюмінію відбувається реакція:



Промивання деіонізованою водою призводить до осадження частинок гідратованого оксиду алюмінію. Оксид містить поверхневі групи $-\text{OH}$, які протонуються у кислому середовищі:



та дисоціюють у лужному;



У нейтральному середовищі (при промиванні) поверхня оксиду є слабкозарядженою, що сприяє налипанню частинок (зразок АОА). У випадку зразка АОА/ГО, за цих умов карбоксильні групи ГО забезпечують негативний заряд поверхні внаслідок дисоціації:



Заряд поверхні запобігає налипанню частинок оксиду.

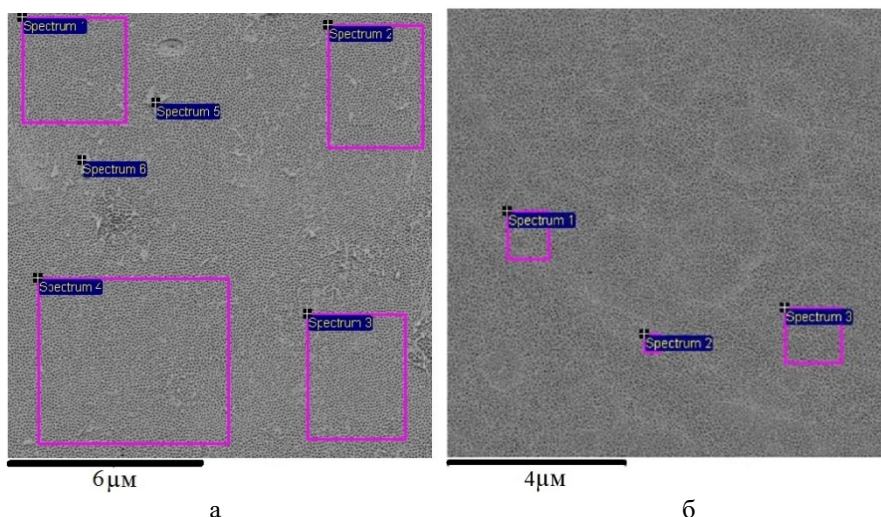


Рис. 3. СЕМ мікрофотографії пористого масиву АОА (а), АОА/ОГ (б), рожевим промарковані ділянки елементного аналізу

Наявність ГО в оксиді алюмінію підтверджується елементним складом поверхні (рис. 4). Дійсно, середній вміст вуглецю у зразку АОА/ГО становить 31.8 %, що значно вище у порівнянні зі зразком АОА. В останньому випадку наявність вуглецю зумовлена адсорбцією аніонів $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ або $[\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ у кислому середовищі, а для зразка АОА/ГО – адсорбцією як аніонів кислоти, так і ОГ. При хімічному травленні алюмінію (відкриття пор) аніони $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ не десорбуються, що вказує на їх інкорпорування саме до об'єму оксиду. Вельми показовим є

мольне співвідношення Al:O, яке становить 0.89 (АОА) та 0.57 (АОА/ГО). Для Al_2O_3 це співвідношення становить 1.1, а для $\text{Al}(\text{OH})_3$ – 0.56. Таким чином, зразок АОА/ГО є ближчий за складом до гідроксиду алюмінію, хоча внесок до загального вмісту кисню роблять інкорпоровані аніони $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ (або $[\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$) та кисневі групи ГО.

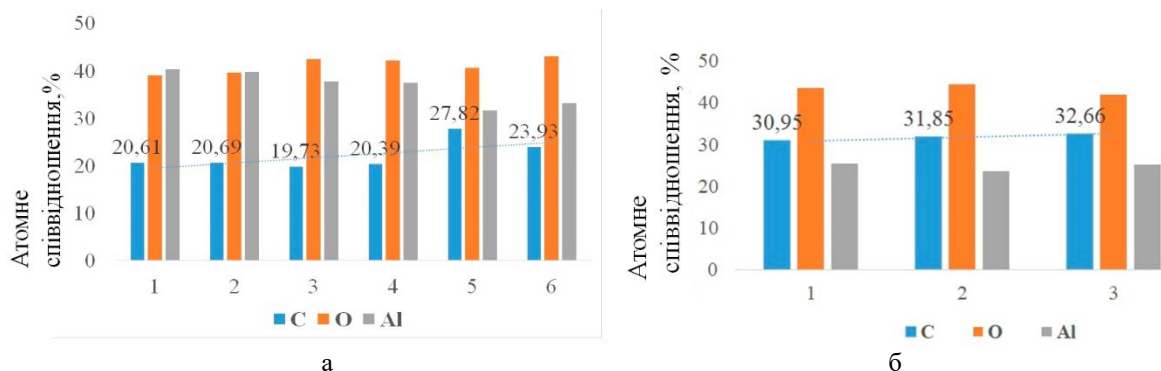
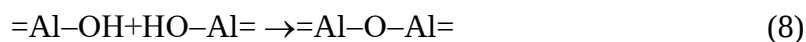


Рис. 4. Елементний склад АОА (а), АОА/ГО (б)

Більший вміст води та вуглецю у зразку АОА/ГО підтверджується й даними термогравіметрії (рис. 5). Нагрівання плівки АОА до температури 600°C призводить до зменшення її маси менш ніж на 1 %, а зразок АОА/ГО втрачає 28% компоненти за аналогічних умов. В діапазоні температур до 100°C втрата маси пов'язана з видаленням незв'язаної води. За вищих температур видаляється зв'язана вода та відбувається декарбонізація інкорпорованих оксалат-іонів (вище 150°C) з утворенням формиат-іонів:



Окрім того, відбувається конденсація груп $-\text{OH}$ за схемою:



При 150°C втрата маси за рахунок води становить 10 %, що набагато перевищує аналогічну величину для АОА.

Екзоефекти вище 200°C пов'язані з кристалізацією: утворенням $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, беміту $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ або(та) байериту $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Ендоефект на ДТА кривих при 470°C обумовлений вигоранням вуглецю. Таким чином, пористі плівки, отримані у присутності ОГ, характеризуються підвищеним вмістом води.

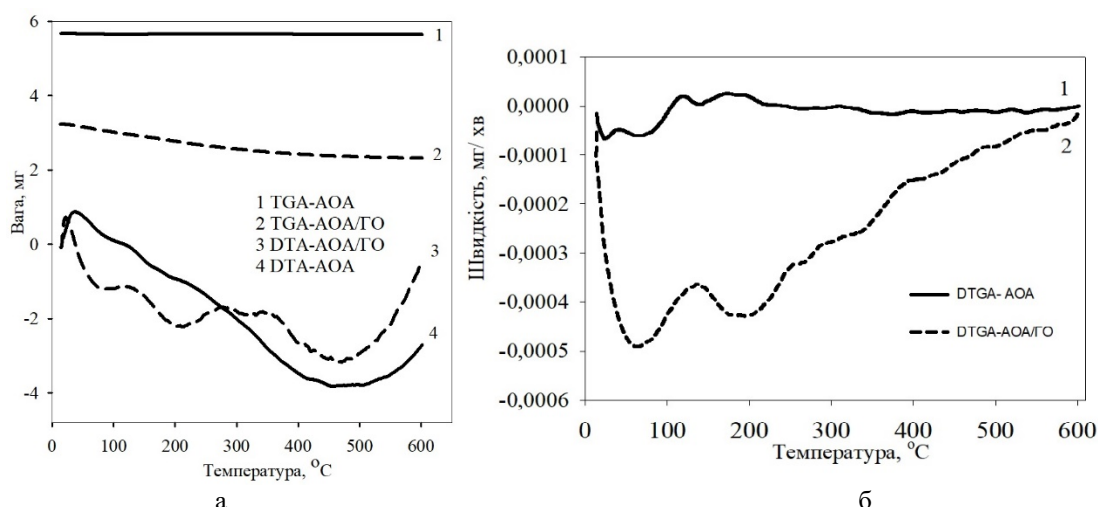


Рис. 5. Термограма пористих плівок АОА (а), АОА/ГО (б)

Зв'язана вода зосереджена у мікропорах, а також на стінках мезо- та макропор, незв'язана вода заповнює мезо- та макропори. Мікропориста структура притаманна для стінок наскрізних пор. Мікропори простежуються на ізотермі адсорбції-десорбції азоту: найбільший підйом ізотерми лангмюрівського типу спостерігається при $P/P_s < 0.35$, що відповідає $r < 1$ нм (рис. 6). На ізотермі практично не простежується гістерезис, що характерно для мікропористих матеріалів. Пори радіусом менше 2 нм видно на диференціальних порограмах. Співставлення характеристик пористої структури обох зразків дозволяє зробити висновок, що для АОА є характерним у ≈ 4 рази менший об'єм мікропор (табл. 1). Відповідно, меншою є й питома поверхня.

Таблиця 1

Структурно-сорбційні характеристики АОА/ОГ

Зразок	$S_{\text{пит}}, \text{м}^2/\text{г}$	$V_{\text{заг}}, \text{см}^3/\text{г}$	$S_{\text{micro}}, \text{м}^2/\text{г}$	$V_{\text{micro}}, \text{см}^3/\text{г}$	$R_{\text{середній}}, \text{нм}$
АОА	13,2	0.038	3,2	$1,1 \times 10^{-3}$	56
АОА/ГО	35,5	0,031	10,2	$4,7 \times 10^{-3}$	22

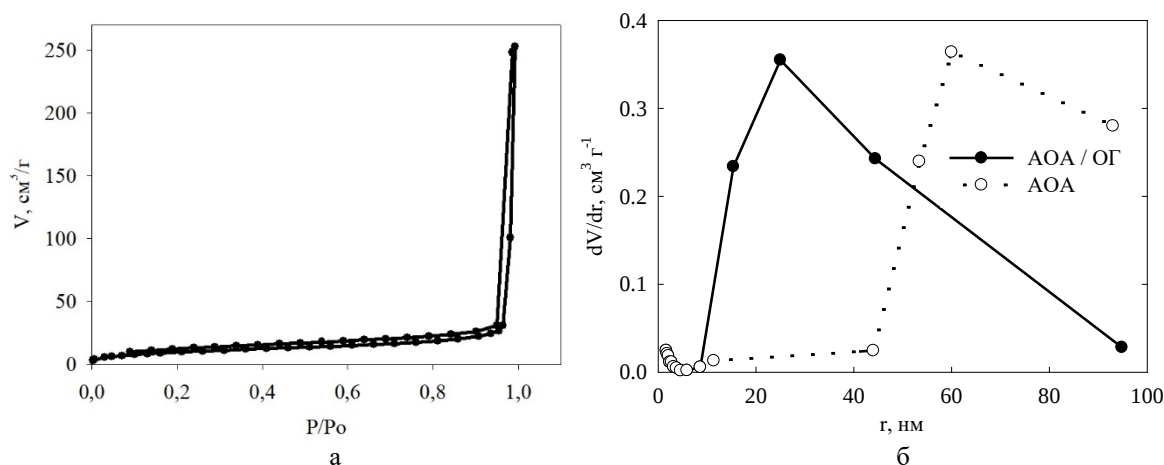


Рис. 6. Ізотерма адсорбції-десорбції азоту для зразка АОА/ГО (а), диференціальний розподіл пор за радіусами для обох зразків (б)

Підтвердженням цього припущення є високороздільні СЕМ зображення зовнішньої мембран (рис. 7). Наведено також фото зразків, з яких не був стравлений бар'єрний шар, що примикав до металу. Цей шар являє дно пор. Поверхня мембран має сотову структуру. На фото АОА помітні пори із розширеннями (ближче до поверхні) та звуженнями (у глибині). Розмір пор на поверхні – 90-100 нм (пори мають форму шестигранника), вглибині помітні овальні отвори 40–50 нм. Товщина стінок пор становить ≈ 20 нм. Дно пор являє собою опуклості радіусом 70–100 нм.

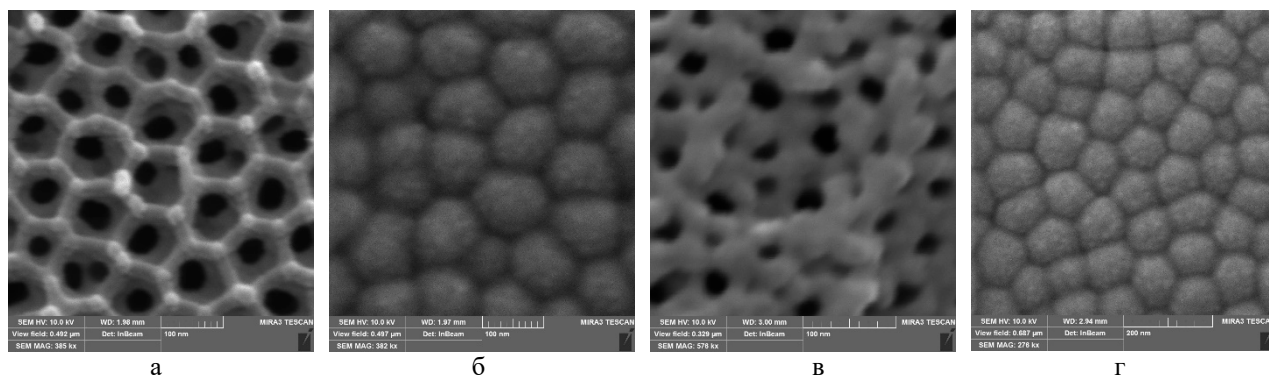


Рис. 7. СЕМ-зображення зразків АОА (а,б) та АОА/ГО (б, г)

У випадку зразка АОА/ГО шестигранні пори відсутні – розширення-звуження поблизу поверхні не помітні. Пори мають овальну форму, їх розмір становить 20-40 нм, а товщина стінок – до 40 нм. Останнє є важливим для механічної міцності мембран. Розмір опуклостей, які відповідають дну пор, становить 20-50 нм. Слід зазначити, що на нанорівні поверхня зразку АОА/ГО є більш рельєфною у порівнянні зі зразком АОА.

Рис. 8 ілюструє поперечний переріз плівок. На зображенні АОА видно дефект структури розміром 2 мкм, який утворився внаслідок окислення мікродомішок у вихідній алюмінієвій фользі. Видно, що наскрізні пори перетинають дефект: підходячи до порожнини, впорядковані прямі канали огинають її. Товщина плівки становить 51 мкм, що відповідає теоретично розрахованому значенню (див. вище). У порівнянні зі зразком АОА, стінки пор АОА/ГО є більш гладкими. У всіх випадках канали є прямими, впорядкованими та наскрізними. Слід підкреслити також відсутність дефектів мікронних розмірів на поперечному перерізі АОА/ГО. Напевно, це пов'язано з антикорозійними властивостями ГО [22]. Його адсорбція на поверхні металу утруднює перенос заряду між електропозитивними домішками та алюмінієм.

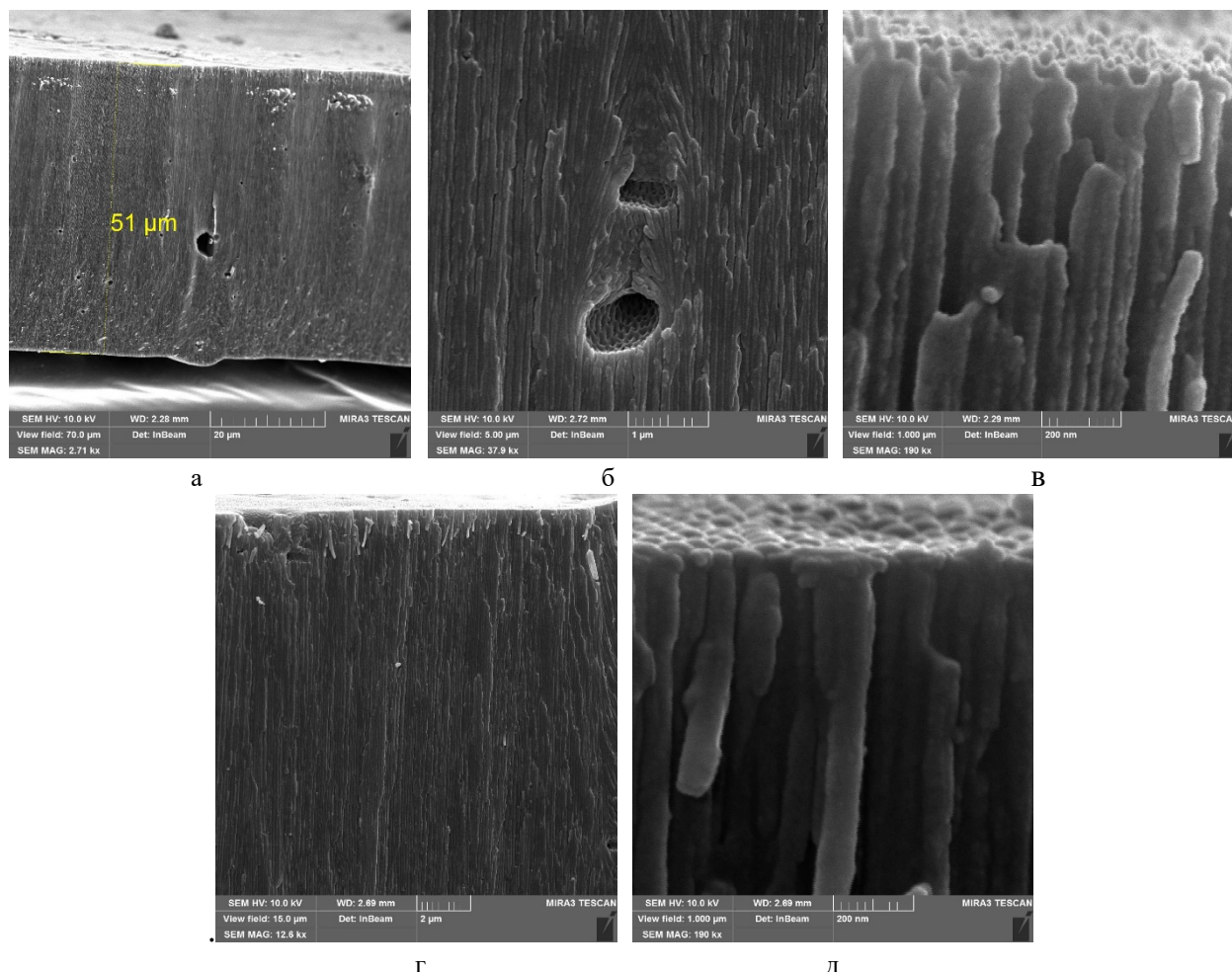


Рис. 8. СЕМ мікрофотографії поперечного зрізу АОА (а-в) та АОА/ГО (г, д).
Дефекти структури спостерігаються на зображеннях (а, б)

Висновки: Додавання нанорозмірного вуглецевого модифікатору ГО до щавлевокислого електроліту призводить до зменшення розміру наскрізних пор, які утворюються в АОА під час анодування, збільшення товщини їх стінок та більш гладкі пори. Вірогідною причиною такого впливу є гідратація ГО: зв'язана вода зменшує Джоулів розігрів металу і, відповідно, електроліту у порах, що формуються при перебігу анодування. Вказані

особливості пористої структури є важливими для масопереносу (гладкі стінки пор), для забезпечення розділової здатності (розміри пор) та механічної міцності мембран (товсті стінки). Наявність вуглецевого модифікатора, інкорпорованого до оксиду, безсумнівно, впливатиме на адсорбційну здатність мембран, що є важливим, наприклад, для видалення токсичних високомолекулярних компонентів з крові при гемодіалізі.

Окрім того, важливим є те, що мембрани з меншими порами можуть бути отримані зі застосуванням неагресивних реагентів.

References

Література

1. Hristovski, K. D., Markovski, J. (2017). Engineering metal (hydr)oxide sorbents for removal of arsenate and similar weak-acid oxyanion contaminants: A critical review with emphasis on factors governing sorption processes. *Sci. Total Environ.* 598, 258–271.
2. Kumar, R., Chawla, J. (2014). Removal of cadmium ion from ater/wastewater by nano-metal oxides: a review. *Water quality, Exposure and Health*, 5, 215–226.
3. Perlova, O. V., Dzyazko, Y. S., Palchik, A. V. et al. (2020). Composites based on zirconium dioxide and zirconium hydrophosphate containing graphene-like additions for removal of U(VI) compounds from water. *Appl Nanosci.* 10, 4591–4602. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01313-1>.
4. Ren, L., Xu, B., Wang, G., Yin, X., Liu, Y., Yang, W., Chen, Y. (2020). Fabrication of an antimony doped tin oxide–graphene nanocomposite for highly effective capacitive deionization of saline water. *RSC Adv.*, 10, 39130–39136. <https://doi.org/10.1039/D0RA08339A>.
5. Kolomiyets, Y. O., Belyakov, V. N., Palchik, A. V., Maltseva, T. V. (2016). Effect of incorporation of hydrated oxides of Sn (IV), Zr (IV) and Fe (III) in a matrix of the anion exchanger Dowex SBR-P on the sorption capacity towards the Arsenic (V) anions. *Int. J. Water Wastewater Treat.*, 2(2). <http://dx.doi.org/10.16966/2381-5299.120>.
6. Perlova, O., Dzyazko, Yu., Halutska, I., Perlova, N., Palchik, A. (2018). Anion exchange resin modified with nanoparticles of hydrated zirconium dioxide for sorption of soluble U(VI) compounds. *Springer Proc. Phys.*, 210, 3–15.
7. Dzyazko, Yu., Volfkovich, Yu., Perlova, O., Ponomaryova, L., Perlova, N., Kolomiets, E. (2019). Effect of Porosity on Ion Transport Through Polymers and Polymer-Based Composites Containing Inorganic Nanoparticles (Review). *Springer Proc. Phys.*, 222, 235–253.
8. Mora-Gómez, J., García Gabaldón, M., Calatayud, M. C., Mestre, S., Pérez-Herranz, V. (2017). Anion transport through ceramic electrodialysis membranes
1. Hristovski K. D., Markovski, J. Engineering metal (hydr)oxide sorbents for removal of arsenate and similar weak-acid oxyanion contaminants: A critical review with emphasis on factors governing sorption processes. *Sci. Total Environ.* 2017. 598. 258–271.
2. Kumar R., Chawla J. Removal of cadmium ion from ater/wastewater by nano-metal oxides: a review. *Water quality, Exposure and Health*. 2014. 5. 215–226.
3. Perlova O. V., Dzyazko Y. S., Palchik A. V. et al. Composites based on zirconium dioxide and zirconium hydrophosphate containing graphene-like additions for removal of U(VI) compounds from water. *Appl Nanosci.* 2020. 10, 4591–4602. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01313-1>.
4. Ren L., Xu B., Wang G., Yin X., Liu Y., Yang W., Chen Y. Fabrication of an antimony doped tin oxide–graphene nanocomposite for highly effective capacitive deionization of saline water. *RSC Adv.* 2020. 10. 39130–39136. <https://doi.org/10.1039/D0RA08339A>.
5. Kolomiyets Y. O., Belyakov V. N., Palchik A. V., Maltseva T. V. Effect of incorporation of hydrated oxides of Sn (IV), Zr (IV) and Fe (III) in a matrix of the anion exchanger Dowex SBR-P on the sorption capacity towards the Arsenic (V) anions. *Int. J. Water Wastewater Treat.* 2016. 2(2). <http://dx.doi.org/10.16966/2381-5299.120>.
6. Perlova O., Dzyazko Yu., Halutska I., Perlova N., Palchik A. Anion exchange resin modified with nanoparticles of hydrated zirconium dioxide for sorption of soluble U(VI) compounds. *Springer Proc. Phys.* 2018. 210. 3–15.
7. Dzyazko Yu., Volfkovich Yu., Perlova O., Ponomaryova L., Perlova N., Kolomiets E. Effect of Porosity on Ion Transport Through Polymers and Polymer-Based Composites Containing Inorganic Nanoparticles (Review). *Springer Proc. Phys.* 2019. 222. 235–253.
8. Mora-Gómez J., García Gabaldón M., Calatayud M. C., Mestre S., Pérez-Herranz V. Anion transport through ceramic electrodialysis membranes made

- made with hydrated cerium dioxide. *J. Amer. Cer. Soc.*, 100(9), 4180–4189.
9. Calatayud, M. C., García-Gabaldón, M., Pérez-Herranz, V., Sales, S., Mestre, S. (2015). Ceramic anion-exchange membranes based on microporous supports infiltrated with hydrated zirconium dioxide. *RSC Adv.*, 5(57), 46348–46358.
10. Dzyaz'ko, Yu. S., Belyakov, V. N., Stefanyak, N. V., Vasilyuk, S. L. (2006). Anion-exchange properties of composite ceramic membranes containing hydrated zirconium dioxide. *Russ. J. Appl. Chem.*, 79, 769–773.
11. Rozhdestvenska, L., Kudelko, K., Ogenko, V., & Chang, M. (2021). Membrane materials based on porous anodic aluminium oxide. *Ukrainian Chemistry Journal*, 86(12), 67–102. <https://doi.org/10.33609/2708-129X.86.12.2020.67-102>.
12. Chernyakova, K., Vrublevsky, I., Vaclovas Klimas, V., Jagminas, A. (2018). Effect of Joule heating on formation of porous structure of thin oxalic acid anodic alumina films. *J. Electrochem. Soc.*, 165(7), P. 289–293.
13. Roslyakov, I. V., Napol'skii, K. S., Evdokimov, P. V., Napol'skiy, F. S., Dunaev, A. V., Eliseev, A. A., Lukashin, A. V., Tret'yakov, Yu. D. (2013). Thermal properties of anodic alumina membranes, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 4(1), 120–129.
14. Abad, B., Maiz, J., Martin-Gonzalez, M. (2016). Rules to determine thermal conductivity and density of anodic aluminum oxide (AAO) membranes. *J. Phys. Chem. C*, 120(10), 5361–5370.
15. Volfkovich, Y. M., Rychagov, A. Y., Sosenkin, V. E., Efimov, O. N., Os'makov, M. I. (2014). Measuring the specific surface area of carbon nanomaterials by different methods. *Russ. J. Electrochem.*, 50(11), 1099–1101.
16. Mu, X., Wu, X., Zhang, T., Go, D. V., Luo, T. (2014). Thermal transport in graphene oxide – from ballistic extreme to amorphous limit. *Sci. Reports.*, 4, 3909.
17. Lin, S., Buehler, M. J. (2014). Thermal transport in monolayer graphene oxide: atomistic insights into phonon engineering through surface chemistry. *Carbon.*, 77, 351–359.
18. Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L. B., Lu, W., Tour, J. M. (2010). Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano.*, 4(8), 4806–4814.
19. Sulka, G. D. (2008). Highly ordered anodic porous alumina formation by self-organized anodizing. Book Editor(s): Dr. Ali Eftekhari. First published: 14 February 2008. <https://doi.org/10.1002/9783527621507.ch1>.
- with hydrated cerium dioxide. *J. Amer. Cer. Soc.* 2017. 100(9). 4180–4189.
9. Calatayud M. C., García-Gabaldón M., Pérez-Herranz V., Sales S., Mestre S. Ceramic anion-exchange membranes based on microporous supports infiltrated with hydrated zirconium dioxide. *RSC Adv.* 2015. 5(57). 46348–46358.
10. Dzyaz'ko Yu. S., Belyakov V. N., Stefanyak N. V., Vasilyuk S. L. Anion-exchange properties of composite ceramic membranes containing hydrated zirconium dioxide. *Russ. J. Appl. Chem.* 2006. 79. 769–773.
11. Rozhdestvenska L., Kudelko K., Ogenko V., Chang M. Membrane materials based on porous anodic aluminium oxide. *Ukrainian Chemistry Journal*. 2021. 86(12). 67–102. <https://doi.org/10.33609/2708-129X.86.12.2020.67-102>.
12. Chernyakova K., Vrublevsky I., Vaclovas Klimas V., Jagminas A. Effect of Joule heating on formation of porous structure of thin oxalic acid anodic alumina films. *J. Electrochem. Soc.* 2018. 165(7). P. 289–293.
13. Roslyakov I. V., Napol'skii K. S., Evdokimov P. V., Napol'skiy F. S., Dunaev A. V., Eliseev A. A., Lukashin A. V., Tret'yakov Yu. D. Thermal properties of anodic alumina membranes, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2013. 4(1). 120–129.
14. Abad B., Maiz J., Martin-Gonzalez M. Rules to determine thermal conductivity and density of anodic aluminum oxide (AAO) membranes. *J. Phys. Chem. C*. 2016. 120(10). 5361–5370.
15. Volfkovich Y. M., Rychagov A. Y., Sosenkin V. E., Efimov O. N., Os'makov M. I. Measuring the specific surface area of carbon nanomaterials by different methods. *Russ. J. Electrochem.* 2014. 50(11). 1099–1101.
16. Mu X., Wu X., Zhang T., Go D. V., Luo T. Thermal transport in graphene oxide – from ballistic extreme to amorphous limit. *Sci. Reports*. 2014. 4. 3909.
17. Lin S., Buehler M. J. Thermal transport in monolayer graphene oxide: atomistic insights into phonon engineering through surface chemistry. *Carbon*. 2014. 77. 351–359.
18. Marcano D. C., Kosynkin D. V., Berlin J. M., Sinitskii A., Sun Z., Slesarev A., Alemany L. B., Lu W., Tour J. M. Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano*. 2010. 4(8). 4806–4814.
19. Sulka G. D. Highly ordered anodic porous alumina formation by self-organized anodizing. Book Editor(s): Dr. Ali Eftekhari. First published: 14 February 2008. <https://doi.org/10.1002/9783527621507.ch1>.

20. Lai, Q., Zhu, S., Xueping Luo, Min Zou, Shuanghua Huang (2012). Ultraviolet-visible spectroscopy of graphene oxides. *American Institute of Physics Advances*, 2, 032146.
21. Çiplak, Z., Yildiz, N., Çalimli, A. (2015). Investigation of graphene/Ag nanocomposites synthesis parameters for two different synthesis methods. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 23(4), P. 361–370.
22. Prabakar, S. J. R., Hwang, Y.-H., Bae, E. G., Lee, D. K., Pyo, M. (2013). Graphene oxide as a corrosion inhibitor for the aluminum current collector in lithium ion batteries. *Carbon*, 52, 128–136.
20. Lai Q., Zhu S., Xueping Luo, Min Zou, Shuanghua Huang. Ultraviolet-visible spectroscopy of graphene oxides. *American Institute of Physics Advances*. 2012. 2. 032146.
21. Çiplak Z., Yildiz N., Çalimli A. Investigation of graphene/Ag nanocomposites synthesis parameters for two different synthesis methods. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2015. 23(4). P. 361–370.
22. Prabakar S. J. R., Hwang Y.-H., Bae E. G., Lee D. K., Pyo M. Graphene oxide as a corrosion inhibitor for the aluminum current collector in lithium ion batteries. *Carbon*. 2013. 52. 128–136.

KUDELKO KATERYNA

Candidate of Chemical Sciences, Research Scientist,
Department of Phisico-Inorganic
Chemistry, Laboratory of Sorbents and
Membrane Materials and Process
V.I. Vernadsky Institute of General and Inorganic
Chemistry National Academy of Sciences
of Ukraine, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7319-8797>
Scopus Author ID: 35194434200
Scopus Author ID: 57220806442
ResearcherID [AAG-1928-2020](https://orcid.org/0000-0002-7319-8797)
E-mail: kathykudelko@gmail.com

BORYSENKO YULIYA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Electrochemical Power
Engineering and Chemistry
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1639-0205>
Scopus Author ID: 57207989822
E-mail: boria95@ukr.net

BARSUKOV VIACHESLAV

Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Department of Electrochemical Power Engineering and Chemistry
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3041-2474>
Scopus Author ID: 8590938100
Researcher ID: O-6308-2017
E-mail: v-barsukov@i.ua

ROZHDESTVENSKAYA LIUDMYLA

Candidate of Chemical Sciences,
Senior Research Scientist
Department of Phisico-Inorganic Chemistry,
Laboratory of Sorbents and Membrane
Materials and Process
V.I. Vernadsky Institute of General
and Inorganic Chemistry National Academy
of Sciences of Ukraine, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7543-5581>
Scopus Author ID: 6603493830
ResearcherID [B-8521-2018](https://orcid.org/0000-0002-7543-5581)
E-mail: ludar@ukr.net

MIKHNIUK ANASTASIA

Maister of Department of Electrochemical
Power Engineering and Chemistry
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
E-mail: mikhnyuknastya472@gmail.com

¹КУДЕЛКО Е. О., ¹РОЖДЕСТВЕНСКАЯ Л. М.,

²БОРИСЕНКО Ю. В., ²МИХНЮК А. О., ²БАРСУКОВ В. З.

¹Институт общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского, Киев, Украина

²Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**ВЛИЯНИЕ ОКСИДА ГРАФЕНА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ
НАНОПОРИСТЫХ АНОДИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Цель исследования: установление влияния добавки углеродного наноразмерного модификатора оксида графена на формирование пористой пленки во время электрохимического окисления алюминия.

Методы исследования: UV-VIS спектры суспензии оксида графена получали, используя спектрофотометр, установление термогравиметрических характеристик анодированного оксида алюминия проводили с помощью термоанализатор, установление поверхностных характеристик проводили методом низкотемпературной сорбции-десорбции азота, расчет поверхности - методом BET, морфологию и структуру поверхности устанавливали с использованием электронного микроскопа.

Результаты: Показана возможность использования углеродных материалов в электрохимических электролитах в процессах анодирования алюминия. Полученные электронные микрофотографии анодированных пленок указывают на влияние введенного углеродного модификатора (оксида графена) в электролит на морфологию получаемого оксида. Результатом процесса является формирование структурной сотовой пленки анодированного оксида с меньшими размерными характеристиками по сравнению с синтезом в аналогичном электролите без модификатора.

Показано, что введение оксида графена (0,25%) в щавелевокислый электролит (0,3М) влияет на стабильность проведения процесса анодирования, определена удельная поверхность образца анодированного алюминия, синтезированного с оксидом графена и составляет 35,5 м²/г, что в три раза больше чем без углеродного модификатора. Согласно сорбционно-поровых исследований, констатируется, что наличие наноразмерного оксида графена в электролите, приводит формированию пор с меньшим радиусом АОА и составляет 22 нм, при этом возрастает общий объем микропор. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования модификатора оксида графена для получения матриц анодированного оксида алюминия. В дальнейшем данные матрицы могут быть использованы для разделения растворов и газов.

Выводы: Введение оксида графена в электролит и в структуру пористого анодированного оксида алюминия показана возможность регулировать пористые пленки.

Ключевые слова: анодированный оксид алюминия; оксид графена; щавелевая кислота; электрохимического синтез.

¹KUDELKO K. O., ¹ROZHDESTVENSKA L. M.,

²BORYSENKO Yu. V., ²MIKHNYUK A. O., ²BARSUKOV V. Z.

¹V.I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry, Kyiv, Ukraine

²Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

FORMATION AND CHARACTERIZATION OF POROUS ANODIZED ALUMINUM OXIDE SYNTHESIZED ELECTROCHEMICAL WITH GRAPHENE OXIDE

Purpose of the research: studying the effect of addition of carbon nanosized modifier graphene oxide on the formation of a porous film during the electrochemical oxidation of aluminum.

Methods: UV-VIS spectra of graphene oxide suspension were obtained using a spectrophotometer, the thermogravimetric characteristics of anodized alumina were determined using a thermal analyzer, the surface characteristics were determined by the low-temperature nitrogen sorption-desorption method, the surface was calculated by the BET method, the morphology and ultrastructure of the surface were determined using electron microscope.

Results: the possibility of using carbon materials for the electrochemical oxidation of aluminum was shown. The obtained electron micrographs indicate the effect of the inserted carbon modifier (graphene oxide) on the morphology of resulting oxide. As a result of this process we observe the formation of the cellular surface of the aluminium oxide with smaller pores compared with sample after synthesis without the modifier.

It was shown that the addition of graphene oxide (0.25%) in the oxalic acid (0,3M) electrolyte effects on the stability of the anodizing process, the specific surface area of the sample of anodized aluminum synthesized with graphene oxide is determined as 35.5 м²/g, and it is three times higher than sample without modifier. According to sorption studies, it could be noted that the presence of nanosized graphene oxide in oxalic acid electrolyte leads to the formation of honey-comb pores with a smaller radius (22 nm), while the total volume of micropores increases. The obtained results allow us to conclude that graphene oxide as modifier is promising material for the preparation of anodized aluminum oxide matrices. In the future, these matrices could be used in processes of solutions and gases separation.

Conclusions: The addition of graphene oxide into the electrolyte changes structure of porous anodized aluminum oxide and has shown the possibility of controlling the porosity of films.

Keywords: anodized aluminum oxide; graphene oxide; oxalic acid; electrochemical synthesis.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.2.6>

УДК 677.027-
19.001

РЕЗАНОВА Н. М., БУДАШ Ю. О., ПЛАВАН В. П.,
КОРШУН А. В., ПРИСТИНСЬКИЙ С. В.

Київський національний університет технологій та дизайну

РЕГУЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ РІДКИХ МІКРОСТРУМЕНІВ ПОЛІПРОПІЛЕНУ В МАТРИЦІ СПІВПОЛІАМІДУ ЗА РАХУНОК НАНОДОБАВОК

Мета. Дослідження впливу концентрації наночастинок оксиду алюмінію (Al_2O_3) та оксиду алюмінію, модифікованого сріблом (Ag/Al_2O_3) на кінетику розпаду рідких мікроструменів поліпропілену (ПП) в матриці співполіаміду (СПА) та можливість керування мікрофібрилярною морфологією суміші ПП/СПА.

Методика. Компоненти суміші змішували на черв'ячно-дисковому екструдері. Кінетику розпаду рідких мікроструменів вивчали за методикою, основаною на теорії дестабілізації рідкого циліндру під дією капілярних хвиль. Ступінь диспергування поліпропілену в матриці оцінювали за мікрофотографіями поперечних зрізів екструдатів сумішей.

Результати. Нанодобавки вихідного і модифікованого сріблом оксиду алюмінію за вмісту $(0,1 \div 3,0)$ мас. % в суміші підвищують сумісність компонентів: поверхневий натяг ($\gamma_{\text{аб}}$) в композиціях усіх складів зменшується. Наночастинки Ag/Al_2O_3 є більш ефективними, в порівнянні з наночастинками оксиду алюмінію – величина $\gamma_{\text{аб}}$ падає у 9,6 і 5,3 рази відповідно, що забезпечує вищий ступінь диспергування компоненту дисперсної фази в матриці. Стійкість мікроструменів поліпропілену до розпаду зростає, про що свідчить зменшення величини коефіцієнта нестабільності (q) та зростання часу життя мікроструменів ($t_{\text{ж}}$). Криві залежності q та $t_{\text{ж}}$ від вмісту добавки мають екстремальний характер – мінімальні значення коефіцієнта нестабільності мікроструменів і максимальні величини часу їх життя досягнуті за концентрації наночастинок, що відповідає найменшій величині міжфазного натягу.

Наукова новизна. Встановлено позитивний вплив досліджених нанодобавок на кінетику розпаду рідких мікроструменів поліпропілену в матриці співполіаміду. Вищий модифікуючий ефект в присутності наночастинок Ag/Al_2O_3 обумовлений їх амфифільною природою, яка забезпечує переважну локалізацію наночастинок на межі поділу фаз та синергічне підвищення ступеню сумісності в системі ПП/СПА.

Практична значимість. Встановлені закономірності щодо підвищення стійкості рідких мікроструменів до розпаду в полімерних сумішах, наповнених наночастинками, дозволять визначити параметри процесів змішування і формування волокон і плівок, за яких мікрофібрилярна структура, що виникає за течії розплаву, залишиться незмінною у виробках.

Ключові слова: суміш полімерів; наночастинка; міжфазний натяг; коефіцієнт нестабільності; мікрострумінь.

Вступ. Одним із ефективних та економічно доцільних методів одержання виробів різноманітного призначення з наперед заданими показниками є використання полімерних сумішей. При цьому комплекс необхідних характеристик досягається за рахунок поєднання властивостей окремих інгредієнтів, а також особливостей гетерогенної структури системи. Промислові методи одержання полімерних композицій пов'язані зі змішуванням та диспергуванням компонентів в розплаві. На відміну від сумішей, які містять твердий наповнювач, дисперсна фаза полімерної композиції може деформуватись та руйнуватись. В результаті, при переробці отримують досить широкий діапазон геометричних форм і розмірів частинок дисперсної фази, що забезпечує можливість керування структурою композиції та властивостями виробів на її основі [1, 2]. Традиційні підходи регулювання морфології полімерних дисперсій ґрунтуються на зміні співвідношення компонентів та їх реологічних властивостей [3], використанні міжфазних модифікаторів [4, 5], а також контролі кінетики процесів диспергування, розпаду, коалесценції і деформування [6, 7]. У

більшості випадків технологічну сумісність компонентів полімерної суміші підсилюють за рахунок використання компатибілізаторів (блок- або привитих співполімерів із сегментами, здатних до фізичної та/або хімічної взаємодії з функціональними групами інгредієнтів) [4, 5]. Дослідження останніх років показали, що як ефективна альтернатива традиційним компатибілізаторам можуть бути використані речовини в наностані. Найчастіше додавання невеликої кількості нанонаповнювачів призводить до підвищення ступеню диспергування крапель та звуження їх розподілу за розмірами [8]. За одночасного введення в полімерну суміш наночастинок (НЧ) різної хімічної природи їх модифікуюча дія зростає за рахунок вибіркової локалізації в одній із фаз або на межі їх поділу [9]. Завдяки амфифільній природі біфункціональні нанонаповнювачі, так звані янус-подібні частинки (*Janus particles*), виступають як ефективні компатибілізатори, що переважно концентруються у перехідному шарі та проявляють синергічну дію на міжфазні процеси, які мають місце в ньому [10].

З точки зору термодинаміки, найбільш стійкою формою крапель є сферична, а їх розміри в суміші залежать від співвідношення в'язкостей компонентів та величини міжфазного натягу. Наночастинки впливають на обидва ці параметри, що розширює спектр можливостей регулювання морфології полімерної дисперсії. Додавання НЧ дозволяє також отримати стійкі несферичні форми: мікрострумені, коалесцентні кластери, ланцюги, мережеву структуру. Так, введення нанокремнезему в суміш поліамід/полістирол (ПА/ПС) забезпечило аномально високу стабільність в часі частинок неправильної форми: окремі домени і фібрили залишалися незмінними впродовж однієї години після зупинки течії розплаву [11]. Наночастинки органомодифікованої глини в біокомпозитах на основі полілактиду обумовили якісну зміну структури суміші від крапельно-матричної до взаємно переплетеної [12].

Постановка завдання. Особливим типом структури в полімерних композитах є мікрофібрилярна, за якої компонент дисперсної фази утворює мікро- або нанофібрили в матричному полімері [2, 3, 13, 14]. Нанодобавки в несумісних сумішах дозволяють змінювати діаметр і довжину фібрил, а також експлуатаційні характеристики нанокompозитів та тонковолокнистих матеріалів на їх основі. Це досягається за рахунок вибору хімічної природи, вмісту, розміру НЧ та послідовності змішування з інгредієнтами. Так, зменшення діаметрів фібрил та збільшення їх долі в структурі композиційних монокиток, сформованих із суміші ПП/СПА/ Al_2O_3 , забезпечило підвищення міцності і початкового модуля моно- і комплексних ниток [15]. Фільтрувальні матеріали із ПП мікрофібрил, наповнених наночастинами вихідного та модифікованого кремнеземів, характеризувалися підвищеними ефективністю очищення і продуктивністю [16].

Таким чином, для розробки мікрофібрилярних композитів з наперед заданою морфологією і властивостями необхідно забезпечити умови, за яких максимальна кількість крапель дисперсної фази деформуватиметься з утворенням рідких циліндрів малих діаметрів, що зберігатимуть свою форму у виробі.

Мета роботи – дослідження впливу концентрації наночастинок Al_2O_3 та $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ на кінетику розпаду рідких мікроструменів поліпропілену в матриці співполіаміду та можливість керування мікрофібрилярною морфологією суміші ПП/СПА.

Матеріали та методи дослідження. Для вирішення поставленої задачі було використано суміш поліпропілен/співполіамід складу 30/70 мас. %. Реологічні характеристики вихідних ПП і СПА наведені в роботі [15]. Як нанонаповнювачі вибрали пірогенний оксид алюмінію та Al_2O_3 , на наночастинки якого нанесені НЧ срібла ($\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$), з питомою поверхнею 109 та 134 m^2/g відповідно та вмістом срібла – 9,5 $\text{мкг}/\text{m}^2$. Концентрація нанодобавок в суміші складала (0,1÷3,0) мас. %. Інгредієнти композиції змішували на черв'ячно-дисковому екструдері, при цьому нанодобавку попередньо вводили в розплав ПП. Експериментальні дослідження закономірностей кінетики розпаду рідких мікроструменів

(циліндрів) ПП в матриці СПА проводили за методикою [17], основою на класичній теорії Томотіки. Одержані результати обробляли за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення [3] та розраховували величину поверхневого натягу на межі поділу фаз ($\gamma_{\alpha\beta}$), коефіцієнт нестабільності струменів (q) та приведений час їх життя ($t_{ж}/R$). Тривалість часу до розпаду струменів ($t_{ж}$) визначали експериментально, як час, впродовж якого при нагріванні руйнувалися всі струмені ПП у поздовжньому зрізі екструдату.

Результати та їх обговорення. Розпад рідких струменів з утворенням крапель відбувається через невідповідне відношення їх поверхні до об'єму. Для ньютонівських рідин процес описується класичним капілярним (хвильовим) механізмом Релея-Тейлора-Томотіки. Причиною руйнування є виникнення на поверхні струменя збурень хвильового характеру, амплітуда яких зростає експоненціально в часі. Під їх дією на поверхні циліндру утворюються потовщення і стоншення, що зумовлює збільшення його вільної поверхневої енергії, а руйнування є результатом прагнення систем її зменшити. При цьому поверхневий натяг, який утримує сферичну форму краплі, не може далі протидіяти силам, що деформують і руйнують її. Дослідження процесів дестабілізації і розпаду рідкого циліндру в стані спокою для в'язкопружних полімерних рідин показали, що початкові стадії процесу відбуваються за тими ж закономірностями, що і для ньютонівських систем, тобто їх розпад також протікає за хвильовим механізмом.

Міжфазний натяг між компонентами суміші є одним із найбільш важливих макроскопічних показників полімерних дисперсій. За його величиною можна судити про поверхневу енергію, структуру та протяжність міжфазного шару, яка є непрямою характеристикою ступеню сумісності полімерів в суміші. Збільшення або зменшення $\gamma_{\alpha\beta}$ дозволяє керувати морфологією одного полімеру в матриці іншого [3, 13, 17]. Так, авторами [18] показана можливість одержання нетканих матеріалів із поліамідних мікро- і поліетиленових нановолокон переробкою трикомпонентних сумішей, що склалися із двох несумісних між собою дисперсних фаз, які мають спорідненість до матричного полімеру (поліетиленоксиду). За цих умов величина міжфазного натягу між матрицею і кожним із волокнуутворюючих компонентів була меншою, в порівнянні з $\gamma_{\alpha\beta}$ між макромолекулами полімерів дисперсної фази.

Для розрахунку міжфазного натягу в досліджуваних системах використали залежність, виходячи з теорії дестабілізації рідкого циліндру під дією хвиль руйнівного збудження в розплаві двох полімерів, один із яких знаходиться у вигляді струменів в матриці іншого:

$$\gamma_{\alpha\beta} = \frac{q \cdot \mu \cdot d_0}{\Omega(\chi, K)}$$

де q – коефіцієнт нестабільності;

μ – в'язкість розплаву матричного полімеру;

d_0 – початковий діаметр струменя;

χ – хвильове число руйнівного збурення;

K – співвідношення в'язкостей дисперсної фази і матриці;

Ω – табульована функція, що визначається з кривої залежності χ від K .

Виконані дослідження показали, що величина $\gamma_{\alpha\beta}$ досягає найбільшого значення для вихідної суміші ПП/СПА, що обумовлено низькою спорідненістю між сегментами макромолекул неполярного поліпропілену і полярного співполіаміду на межі поділу фаз (рис. 1). Введення наночастинок Al_2O_3 та $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ підвищує сумісність між компонентами в нанонаповнених системах, про що свідчить зменшення показників $\gamma_{\alpha\beta}$ для композицій усіх складів.

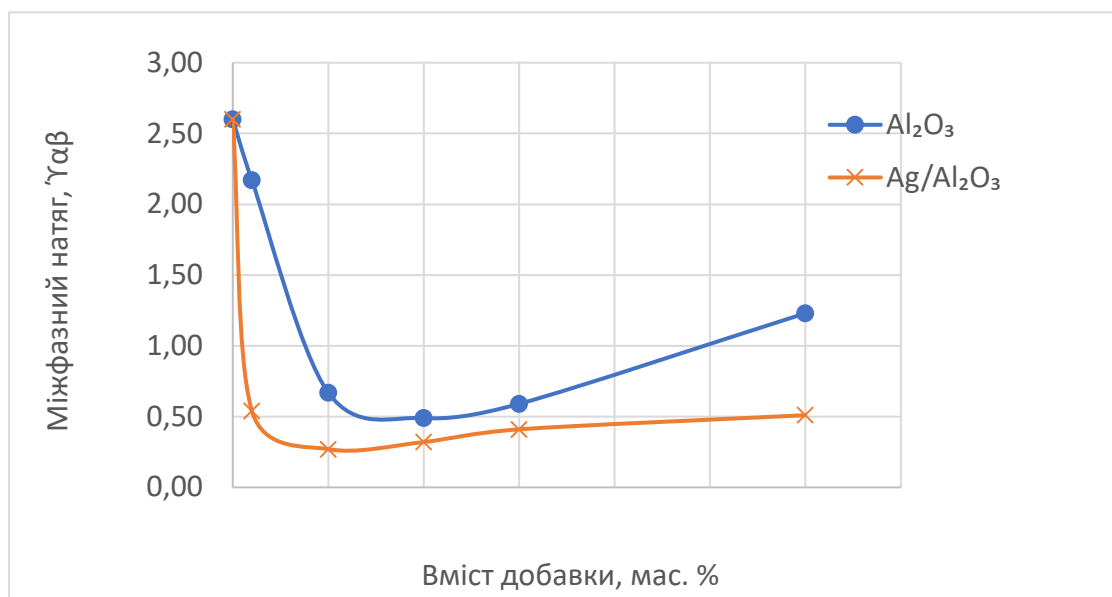


Рис. 1. Залежність величини міжфазного натягу $\gamma_{\alpha\beta}$ (мН/м) нанонаповнених сумішей ПП/СПА від вмісту добавки

Як видно із рисунку 1, емульгуюча дія нанорозмірного оксиду алюмінію з нанесеними на його поверхню НЧ срібла є вищою, порівняно з вихідним оксидом. Величина міжфазного натягу падає майже на порядок, при цьому максимальний ефект досягається за меншої концентрації добавки в суміші. Криві залежності $\gamma_{\alpha\beta} = f(\text{вміст})$ мають екстремальний характер – мінімальні значення відповідають концентрації 0,5 і 1,0 мас. % для наночастинок Ag/Al₂O₃ та Al₂O₃ відповідно. Подальше зростання кількості обох нанодобавок в системі призводить до збільшення величини міжфазного натягу, як і при використанні класичних компатибілізаторів [19]. Це може бути пов'язано з тим, що за умови досягнення критичної концентрації НЧ виділяються в окрему фазу, а їх поверхнева активність падає. Вищий модифікуючий ефект, досягнутий в присутності наночастинок Ag/Al₂O₃, очевидно обумовлений їх амфифільною природою: срібло проявляє спорідненість до неполярного ПП, а оксид алюмінію – до полярних функціональних груп СПА. Завдяки цьому вони переважно локалізуються на межі поділу фаз та синергічно впливають на сумісність компонентів в системі. Зниження міжфазного натягу в сумішах, наповнених наночастинами Ag/Al₂O₃ та Al₂O₃, зумовлює підвищення ступеню диспергування та однорідності розподілу крапель поліпропілену в матриці СПА через зниження затрат енергії на утворення нових поверхонь дисперсної фази (рис. 2).

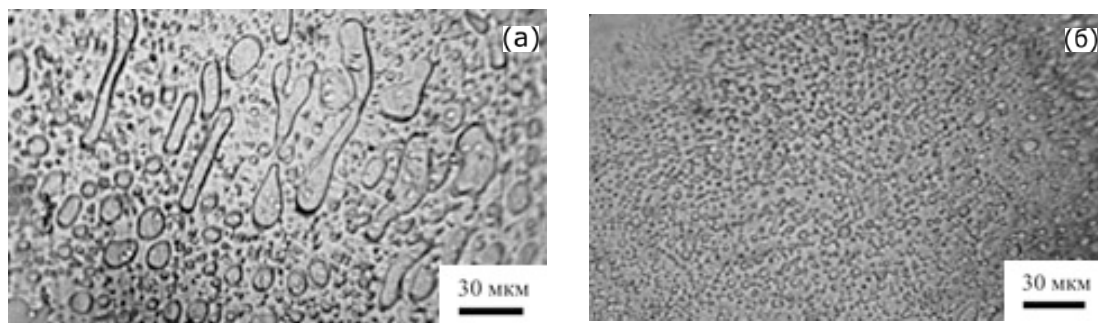


Рис. 2. Мікрофотографії поперечних зрізів екструдатів ПП/СПА сумішей: вихідної (а); та модифікованої 0,5 мас. % Ag/Al₂O₃ (б)

Максимальний ефект досягнуто в сумішах, наповнених біфункціональними НЧ модифікованого оксиду алюмінію. Цей результат є очікуваним, оскільки відомо, що емульгуюча дія нанодобавок суттєво залежить від їх спорідненості до того чи іншого компонентів системи.

Відомо, що чинники, які впливають на деформацію краплі, визначають також і умови руйнування рідкого циліндра [13, 17]. Гідродинамічна стійкість рідкого струменя, згідно з теорією Томотіки, визначається коефіцієнтом нестабільності (q) та часом життя ($t_{ж}$), впродовж якого його циліндрична форма залишається незмінною. Показник q прямо пропорційний величині міжфазного натягу та є складною функцією хвильового числа, співвідношення в'язкостей дисперсної фази і дисперсійного середовища [17]. Фізична суть поверхневого натягу полягає в тому, що він діє як дестабілізуюча сила, зумовлюючи розпад рідких струменів за капілярним механізмом, тобто вони зберігатимуть стабільність за менших величин γ_{af} .

Аналіз експериментальних результатів щодо впливу модифікуючих добавок на стійкість ПП мікроструменів показав, що введення наночастинок Al_2O_3 і Ag/Al_2O_3 в суміш ПП/СПА суттєво впливає на параметри кінетики їх розпаду. Залежності показників q і $t_{ж}$ від вмісту НЧ мають протилежний характер (рис. 3,4).

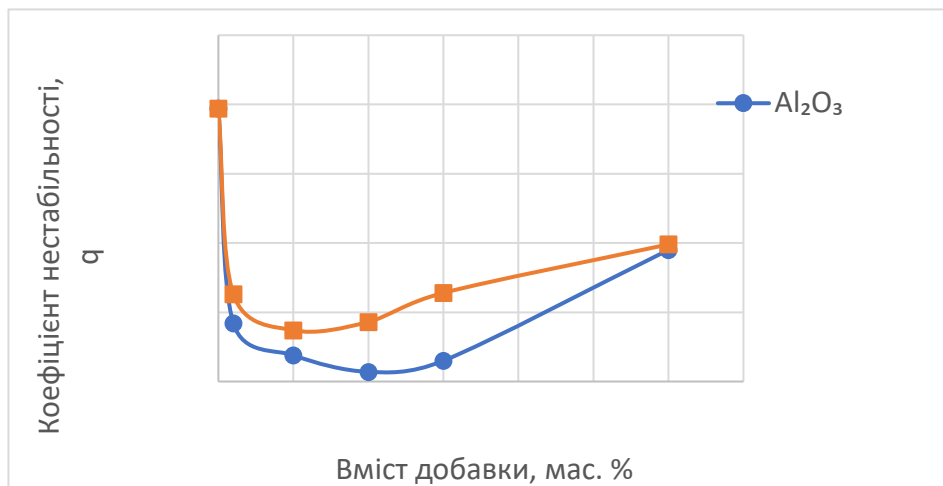


Рис. 3. Залежність коефіцієнта нестабільності (q) від вмісту добавки в нанонаповнених сумішах ПП/СПА

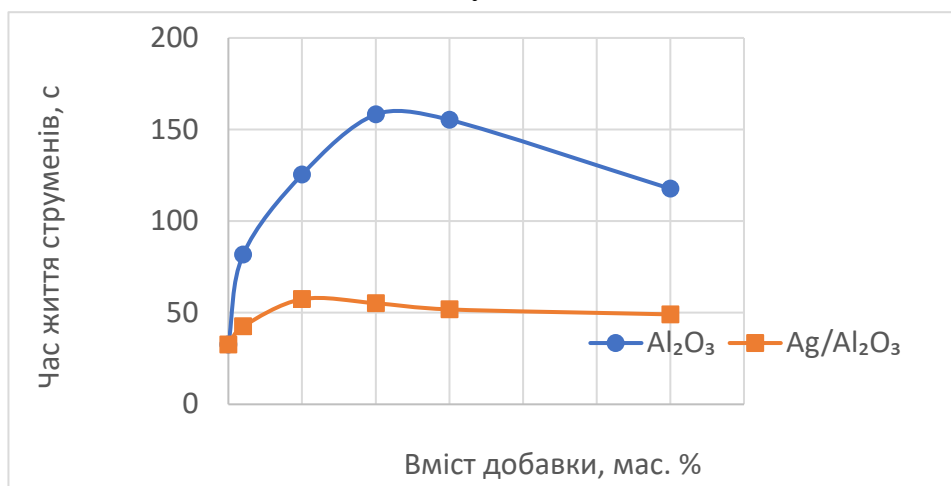


Рис. 4. Залежність часу життя мікроструменів ($t_{ж}$, с) від вмісту добавки в нанонаповнених сумішах ПП/СПА

В нанонаповнених композиціях коефіцієнт нестабільності зменшується, а час життя мікроструменів зростає для всіх досліджених концентрацій добавок. Це свідчить про підвищення стійкості рідких циліндрів ПП до руйнування. При цьому мінімальне значення q і максимальна величина $t_{ж}$ досягнуті за вмісту наповнювача, якому відповідає найменша величина поверхневого натягу.

Як видно із рисунку 4, сповільнення процесів дестабілізації і руйнування мікроструменів ПП у матриці СПА залежить від типу вибраного нанонаповнювача – час до їх розпаду в присутності НЧ оксиду алюмінію значно вищий, порівняно з біфункціональною добавкою. Це можна пояснити, тим, що вибрані модифікатори по-різному впливають на ступінь взаємодії між макромолекулами полімерів у міжфазній зоні та в'язко-пружні властивості змішуваних компонентів, які визначають процес дестабілізації мікроструменів. Значний вплив на стійкість циліндрів до руйнування мають також їх розмірні характеристики, оскільки час життя прямо пропорційний радіусу струменя перед розпадом [17]. Відомо, що дисперсії двох полімерів максимально нестійкі за умови, що фібрили є переважаючим типом структури, а їх діаметри мінімальні [13]. Розрахований приведенний час життя ($t_{ж}/R$) мікроструменів ПП для вихідної суміші складає 24,5 с/мкм. В присутності наночастинок Al_2O_3 та Ag/Al_2O_3 він зростає для обох добавок майже у 2 рази (до 48,1 та 46,3 с/мкм відповідно), що свідчить про підвищення стійкості до розпаду фібрил мінімальних діаметрів. Утворення тонших мікрофібрил в нанонаповнених полімерних композиціях може бути обумовлено тим, що одночасно з емульгуючою дією, тверді НЧ в струменях пригнічують ріст амплітуди руйнівного збурення та знижують її величину і таким чином запобігають розпаду найтонших мікроструменів на краплі, як термодинамічно найбільш нестійких. Стабілізуюча дія наночастинок може бути також пов'язана з обмеженням релаксацийних процесів в ланцюгах макромолекул компонентів суміші.

Висновки. Встановлено, що введення в розплав суміші поліпропілен/співполіамід наночастинок оксиду алюмінію (Al_2O_3) та оксиду алюмінію, модифікованого сріблом (Ag/Al_2O_3) в кількості (0,1–3,0) мас. % дозволяє підвищити стійкість до розпаду рідких мікроструменів ПП в матриці СПА. Показано, що нанодобавки проявляють емульгуючу дію в композиціях за всіх досліджених концентрацій. Це обумовлює зниження величини міжфазного натягу та підвищення ступеню диспергування і деформації крапель ПП у рідкі струмені. Стійкість мікроструменів до розпаду зростає, про що свідчить збільшення часу їх життя та зниження коефіцієнта нестабільності. Сповільнення процесів дестабілізації і руйнування мікроструменів ПП у матриці СПА залежить від типу вибраного нанонаповнювача. Біфункціональна добавка Ag/Al_2O_3 є більш ефективною – мінімальні значення міжфазного натягу та максимальний час до розпаду мікроструменів досягаються за меншого вмісту нанодобавки в композиції. Модифікуюча дія є функцією вмісту наночастинок і стає максимальною за концентрації Al_2O_3 – 1,0 мас. % та Ag/Al_2O_3 – 0,5 мас. %. При цьому величина міжфазного натягу зменшується з 2,60 у вихідній суміші до 0,49 та 0,27 мН/м відповідно, а час життя мікроструменів зростає у 4,9 та 1,7 рази.

Зміна процесів деформації і підвищення стійкості до розпаду мікрофібрилярних структур дисперсної фази шляхом введення нанодобавок в суміші полімерів сприятиме розробці нанокомпозитів з наперед заданими морфологією та властивостями, а також нових тонковолокнистих матеріалів з покращеними характеристиками.

References

Література

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Muralisrinivasan, N. S. (2017). Polymer Blends and Composites. <i>Chemistry and technology</i>. New York: John Wiley & Sons. 352 p.2. Thomas, S., Mishra, R., Kalarikka, N. (2017). Micro and nano fibrillar composites (mfcs and nfcs) from polymer | <ol style="list-style-type: none">1. Muralisrinivasan N. S. Polymer Blends and Composites. <i>Chemistry and technology</i>. New York: John Wiley & Sons. 2017. 352 p.2. Thomas S., Mishra R., Kalarikka N. Micro and nano fibrillar composites (mfcs and nfcs) |
|--|---|

blends. Woodhead Publishing. 2017. 372 p.

3. Rezanova, V. G., Rezanova, N. M. (2020). Software for the study of polymer systems. K.: Publishing House "ArtEk". 358 p. [in Ukrainian].

4. Papadopoulou, C. P., Kalfoglou, N. K. (2000). Comparison of compatibilizer effectiveness for PET/PP blends; their mechanical, thermal and morphology characterization, *Polym.* № 41. P. 2543–2555.

5. Gersappe, D., Irvine, D., Balazs, A. C., Liu, Y., Sokolov, J., Rafailovich, M., Schwarz, S., Peiffer, D. G. (1994). The Use of Graft Copolymers to Bind Immiscible Blends. *Science*. Vol. 265. P. 1072–1074.

6. Doan, V. A., Yamaguchi, M. (2013). Interphase transfer of nanofillers and functional liquid between immiscible polymer pairs. *Recent Res. Devel. Mat. Sci.* № 10. P. 59–88.

7. Xiu, H., Bai, H. W., Huang, C. M., Jiang, F., Chem, F., Deng, H., Wang, K., Zang, Q., Fu, Q. (2014). Improving impact toughness of polylactide/poly(ether)urethane blends via designing the phase morphology assistend by hydrophilic silica nanoparticles. *Polym.* 2014. Vol. 6, № 55. P. 1593–1600.

8. Luna, M. S., Filippone, G. (2016). Effects of Nanoparticles on the Morphology of Immiscible Polymer Blends – Challenges and Opportunities. *Eur. Polym. J.* № 79. P. 198–218.

9. Chen, G., Li, P., Huang, Y., Kong, M., Yang, Q., Li, G. (2014). Hybrid Nanoparticles with Different Surface Chemistries Show Higher Efficiency in Compatibilizing Immiscible Polymer Blends. *Compos. Sci. Technol.* 2014. Vol. 105. P. 37–43.

10. Bahrami, R., Löbbling, T. I., Schmalz, H., Müller, A. H. E., Altstädt, V. (2017). Synergistic Effects of Janus Particles and Triblock Terpolymers on Toughness of Immiscible Polymer Blends. *Polym.* № 109. P. 229–2370.

11. Kong, M., Huang, Y., Lv, Y., Wang, S., Yang, Q., Li, G. (2014). Flow-Induced Morphological Instability in Nanosilica-Filled Polyamide 6/polystyrene Blends. *Polym.* Vol. 16, № 55. P. 4348–4357.

12. Nuzzo, A., Coiai, S., Carroccio, S. C., Dintcheva, N. T., Gambarotti, C., Filippone, G. (2014), Heat-Resistant Fully Bio-Based Nanocomposite Blends Based on Poly (lactic Acid). *Macromol. Mater. Eng.* Vol. 1, № 299. P. 31–40.

from polymer blends. Woodhead Publishing. 2017. 372 p.

3. Резанова В. Г., Резанова Н. М. Програмне забезпечення для дослідження полімерних систем. К.: Видавничий дім "АртЕк", 2020. 358 с.

4. Papadopoulou C. P., Kalfoglou N. K. Comparison of compatibilizer effectiveness for PET/PP blends; their mechanical, thermal and morphology characterization. *Polym.* 2000. № 41. P. 2543–2555.

5. Gersappe D., Irvine D., Balazs A. C., Liu Y., Sokolov J., Rafailovich M., Schwarz S., Peiffer D. G. The Use of Graft Copolymers to Bind Immiscible Blends. *Science*. 1994. Vol. 265. P. 1072–1074.

6. Doan V. A., Yamaguchi M. Interphase transfer of nanofillers and functional liquid between immiscible polymer pairs. *Recent Res. Devel. Mat. Sci.* 2013. № 10. P. 59–88.

7. Xiu H., Bai H. W., Huang C. M., Jiang F., Chem F., Deng H., Wang K., Zang Q., Fu Q. Improving impact toughness of polylactide/poly(ether)urethane blends via designing the phase morphology assistend by hydrophilic silica nanoparticles. *Polym.* 2014. Vol. 6, № 55. P. 1593–1600.

8. Luna M. S., Filippone G. Effects of Nanoparticles on the Morphology of Immiscible Polymer Blends – Challenges and Opportunities. *Eur. Polym. J.* 2016. № 79. P. 198–218.

9. Chen G., Li P., Huang Y., Kong M., Yang Q., Li G. Hybrid Nanoparticles with Different Surface Chemistries Show Higher Efficiency in Compatibilizing Immiscible Polymer Blends. *Compos. Sci. Technol.* 2014. Vol. 105. P. 37–43.

10. Bahrami R., Löbbling T. I., Schmalz H., Müller A. H. E., Altstädt V. Synergistic Effects of Janus Particles and Triblock Terpolymers on Toughness of Immiscible Polymer Blends. *Polym.* 2017. № 109. P. 229–237.

11. Kong M., Huang Y., Lv Y., Wang S., Yang Q., Li G. Flow-Induced Morphological Instability in Nanosilica-Filled Polyamide 6/polystyrene Blends. *Polym.* 2014. Vol. 16, № 55. P. 4348–4357.

12. Nuzzo A., Coiai S., Carroccio S. C., Dintcheva N. T., Gambarotti C., Filippone G. Heat-Resistant Fully Bio-Based Nanocomposite Blends Based on Poly(lactic Acid). *Macromol. Mater. Eng.* 2014. Vol. 1, № 299. P. 31–40.

13. Rezanova N. M., Budash Yu. O., Plavan V. P. (2017). Innovative technologies of chemical fibers. Kyiv: KNUTD. 240 p [in Ukrainian].
14. Li, W., Schlarb, A. K., Evstatiev, M. (2009). Study of PET/PP/TiO₂ microfibrillar-structured composites: Part 1. Preparation, morphology and dynamic mechanical analysis of fibrillized blends. *J. Appl. Polym. Sci.* № 113. P. 1471–1479.
15. Plavan, V. P., Rezanova, V. G., Budash, Yu. O., Ishchenko, O. V., Rezanova, N. M. (2020). Influence of aluminum oxide nanoparticles on formation of the structure and mechanical properties of microfibrillar composites. *Mechanics of Composite Materials*. Vol. 56, № 3. P. 1–14.
16. Rezanova, N. M., Rezanova, V. G., Plavan, V. P., Viltaniuk, O. O. (2019). Polypropylene fine-fiber filter materials modified with nano-additives. *Funct. Mater.* Vol. 26, № 2. P. 389–396.
17. Tsebrenko, M. V., Danilova, G. P., Malkin, A. Ya. (1989). Ultrafine Fibers in Flow of Mixtures of non-Newtonian Polymer melts. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* Vol. 31. P. 1–26.
18. Jin, K., Eyer, S., Dean, W., Kitto, D., Bates, F. S., Ellison, C. J. (2019). Bimodal nano- and micro-fiber nonwovens by melt blowing immiscible ternary polymer blends. *Industrial and Engineering Chemistry Research*.
19. Ju, M.-Y., Chang, F. C. (2000). Compatibilization of PET/PS blends through SMA and PMPI dual compatibilizers. *Polym.* Vol. 41, № 5. P. 1719–1730.
13. Резанова Н. М., Будащ Ю. О., Плаван В. П. Інноваційні технології хімічних волокон. Київ: КНУТД, 2017. 240 с.
14. Li W., Schlarb A. K., Evstatiev M. Study of PET/PP/TiO₂ microfibrillar-structured composites: Part 1. Preparation, morphology and dynamic mechanical analysis of fibrillized blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 2009. № 113. P. 1471–1479.
15. Plavan V. P., Rezanova V. G., Budash Yu. O., Ishchenko O. V., Rezanova N. M. Influence of aluminum oxide nanoparticles on formation of the structure and mechanical properties of microfibrillar composites. *Mechanics of Composite Materials*. 2020. Vol. 56, № 3. P. 1–14.
16. Rezanova N. M., Rezanova V. G., Plavan V. P., Viltaniuk O. O. Polypropylene fine-fiber filter materials modified with nano-additives. *Funct. Mater.* 2019. Vol. 26, № 2. P. 389–396.
17. Tsebrenko M. V., Danilova G. P., Malkin A. Ya. Ultrafine Fibers in Flow of Mixtures of non-Newtonian Polymer melts. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1989. Vol. 31. P. 1–26.
18. Jin K., Eyer S., Dean W., Kitto D., Bates F. S., Ellison C. J. Bimodal nano- and micro-fiber nonwovens by melt blowing immiscible ternary polymer blends. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2019.
19. Ju M.-Y., Chang F. C. Compatibilization of PET/PS blends through SMA and PMPI dual compatibilizers. *Polym.* 2000. Vol. 41, № 5. P. 1719–1730.

REZANOVA NATALIA

Candidate of Technical Science, Senior Researcher
Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7956-3767>
Scopus Author ID: 6603468432
E-mail: mfibers@ukr.net

PLAVAN VIKTORIIA

Doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>
Scopus Author ID: 6603130130
Researcher ID: I-5852-2015
E-mail: plavan.vp@knutd.edu.ua

BUDASH YURII

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8718-1577>
Scopus Author ID: 9134072100
Researcher ID: H-6012-2018
E-mail: budash.yo@knutd.edu.ua

KORSHUN ALLA

Researcher
Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
E-mail: alla.korshun31@gmail.com

PRYSTYNSKYI SERHII

Master, Postgraduate

Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-1387-8352>

Researcher ID: ABE-3954-2021

E-mail: s.prystynskyi@outlook.com

РЕЗАНОВА Н. М., БУДАШ Ю. А., ПЛАВАН В. П.,
КОРШУН А. В., ПРИСТИНСКИЙ С. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

РЕГУЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЖИДКИХ МИКРОСТРУМИЙ ПОЛИПРОПИЛЕНА В МАТРИКЕ СОПОЛИАМИДА ЗА СЧЕТ НАНОДОБАВОК

Цель. Исследование влияния концентрации наночастиц оксида алюминия (Al_2O_3) и оксида алюминия, модифицированного серебром (Ag/Al_2O_3) на кинетику распада жидких микроструй полипропилена (ПП) в матрице сополиамида (СПА) и возможность управления микрофибриллярной морфологией смеси.

Методика. Компоненты смеси смешивали на червячно-дисковом экструдере. Кинетику распада жидких микроструй изучали по методике, основанной на теории дестабилизации жидкого цилиндра под действием капиллярных волн. Степень диспергирования полипропилена в матрице оценивали по микрофотографиям поперечных срезов экструдатов смесей.

Результаты. Нанодобавки исходного и модифицированного серебром оксида алюминия по содержанию (0,1÷3,0) мас. % в смеси повышают совместимость компонентов: поверхностное натяжение ($\gamma_{\text{св}}$) в композициях всех составов уменьшается. Наночастицы Ag/Al_2O_3 более эффективны, по сравнению с наночастицами оксида алюминия – величина $\gamma_{\text{св}}$ падает в 9,6 и 5,3 раза соответственно, что обеспечивает высшую степень диспергирования компонента дисперсной фазы в матрице. Устойчивость микроструй полипропилена к распаду возрастает, о чем свидетельствует уменьшение величины коэффициента неустойчивости (q) и рост времени жизни микроструй ($t_{\text{ж}}$). Кривые зависимости q и $t_{\text{ж}}$ от содержания добавки носят экстремальный характер – минимальные значения коэффициента неустойчивости микроструй и максимальные величины времени их жизни достигнуты при концентрации наночастиц, что соответствует наименьшей величине межфазного натяжения.

Научная новизна. Установлено положительное влияние исследованных нанодобавок на кинетику распада жидких микроструй полипропилена в матрице сополиамида. Высший модифицирующий эффект в присутствии наночастиц Ag/Al_2O_3 обусловлен их амфифильной природой, обеспечивающей преобладающую локализацию наночастиц на границе разделения фаз и синергическое повышение степени совместимости в системе ПП/СПА.

Практическая значимость. Установленные закономерности по повышению стойкости жидких микроструй к распаду в полимерных смесях, наполненных наночастицами, позволят определить параметры процессов смешивания и формирования волокон и пленок, при которых возникающая по течению расплава микрофибриллярная структура останется неизменной в изделиях.

Ключевые слова: смесь полимеров; наночастица; межфазное натяжение; коэффициент неустойчивости; микроструи.

REZANOVA N. M., BUDASH YU. O., PLAVAN V.P.,
KORSHUN A. V., PRYSTYNSKYI S. V.

Kyiv National University Technologies and Design, Ukraine

**REGULATION OF THE STABILITY OF LIQUID MICROJETS OF POLYPROPYLENE
IN A COPOLYAMIDE MATRIX AT THE EXPENSE OF NANOADDITIVES**

Goal. Investigation of the effect of the concentration of nanoparticles of aluminum oxide (Al_2O_3) and alumina modified with silver ($\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$) on the decomposition kinetics of liquid microjets of polypropylene (PP) in a copolyamide (CPA) matrix and the possibility of controlling the microfibrillar morphology of the PP/CPA blend.

Methodology. The components of the blend were mixed on a screw-disk extruder. The kinetics of the disintegration of liquid microjets was studied using a technique based on the theory of destabilization of a liquid cylinder under the action of capillary waves. The degree of dispersion of polypropylene in the matrix was evaluated by photomicrographs of cross sections of the extrudates of the blends.

Results. Nanoadditives of the original and silver-modified aluminum oxide with a content of $(0.1 \div 3.0)$ wt.% in the blend increase the compatibility of the components: the surface tension ($\gamma_{\alpha\beta}$) in the compositions of all compositions decreases. $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ nanoparticles are more effective than aluminum oxide nanoparticles - the $\gamma_{\alpha\beta}$ value decreases by 9.6 and 5.3 times, respectively, which ensures a high degree of dispersion of the dispersed phase component in the matrix. The disintegration resistance of polypropylene microjets is increasing, as evidenced by a decrease in the instability coefficient (q) and an increase in the microjet lifetime (t_l). The curves of q and t_l dependence on the additive content have an extreme character. The minimum values of the instability coefficient of microjets and the maximum values of their lifetime are achieved at a nanoparticle concentration corresponding to the lowest interfacial tension.

Scientific novelty. The positive effect of the investigated nanoadditives on the kinetics of the decomposition of liquid microjets of polypropylene in the copolyamide matrix has been established. The highest modifying effect in the presence of $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ nanoparticles is due to their amphiphilic nature, which ensures the predominant localization of nanoparticles at the interface and a synergistic increase in the degree of compatibility in the PP/CPA system.

Practical significance. The regularities of increasing the stability of liquid microjets to disintegration in polymer blends filled with nanoparticles have been established, which will make it possible to determine the parameters of the processes of mixing and forming fibers and films, in which the microfibrillar structure arising during the flow of the melt will remain unchanged in the products.

Keywords: polymers blend; nanoparticle; interfacial tension; coefficient of instability; microjet.

ЗАПРОШУЄМО ДО СПІВРОБІТНИЦТВА

Тематична спрямованість журналу «Технології та інжиніринг» (Technologies and Engineering):

Мехатронні системи. Ресурсозбереження та енергоефективність.

Матеріалознавство індустрії моди, технології виробництва текстилю, одягу та взуття.

Хімічні та біофармацевтичні технології.

Видання орієнтоване на науковців, викладачів, аспірантів, студентів, а також науково-практичних працівників і фахівців відповідних галузей промисловості.

Періодичність видання – 6 раз на рік. Журнал видається українською, російською, англійською мовами, анотації – українською, російською і англійською мовами. Матеріали, що надходять для публікації в журналі, проходять рецензування з боку членів редакційної колегії, розглядаються та рекомендуються Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну до друку.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ЩОДО ПОДАННЯ РУКОПИСУ СТАТЕЙ

наукового фахового видання «Технології та інжиніринг» (Technologies and Engineering)

Редакційна колегія журналу «Технології та інжиніринг» приймає до розгляду наукові статті авторів за матеріалами досліджень і науково-технічних розробок. Подані статті розглядаються редакційною колегією журналу «Технології та інжиніринг», і після отримання позитивної рецензії приймаються до публікації.

ПРАВИЛА ПОДАННЯ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ

Для публікації автори подають в редакцію журналу:

(ЕТАП 1) Подаються 2 електронних файли рукопису на електронну адресу vistnuk@knu.edu.ua:

– один файл – в текстовому редакторі *Microsoft Word for Windows* (версії 97/2000/XP/2003).

Назва файлів: *Прізвище_statja_ukr.docx* та *Прізвище_statja_ukr.pdf*

В темі листа обов'язково вказується: Стаття у «Технології та інжиніринг».

- Другий файл – сканована копія заяви на перевірку на ознаки академічного плагіату (Додаток 3).

Після отримання електронного примірника рукопису наукової статті, Редакція направляє підтвердження щодо прийняття матеріалів на анонімне рецензування (у разі результату на ознаки академічного плагіату менше 9,99% схожості у Системі "Unicheck"). У разі необхідності Редакція направляє автору (-ам) пропозиції врахувати зауваження при підготовці статті та доопрацювати її.

(ЕТАП 2) Остаточний, після доопрацювання, до Редакції подаються:

1) 1 узгоджений електронний варіант статті (файл – Word формату). Назва файлу: *Прізвище_statja_ukr.docx*;

2) відомості про автора (-ів) (укр., рос. та англ. мовами): ПІБ, вчений ступінь та звання, місце роботи (навчання), посада, місто, телефон, e-mail.

Назва файлу: *Прізвище_vidom.docx*;

3) угоду про публікацію з автором (-ами) статті про авторські права;

4) оригінал платіжного документа, який засвідчує оплату за публікацію. **ОПЛАТА ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ ПІСЛЯ ВНУТРІШНЬОГО РЕЦЕНЗУВАННЯ ТА ПРИЙНЯТТЯ СТАТТІ ДО ДРУКУ.**

Відсутність зазначеного вище, а, також, відсутність підписів авторів або узгоджувачих віз, невідповідність вимогам засобу комунікації, наявність орфографічних, граматичних та стилістичних помилок, нехтування необхідністю дотримання лексичних, граматичних і стилістичних норм мови перекладу – **є підставою для відмови** в опублікуванні статті.

Датою надходження рукопису статті в редакцію вважається дата надсилання її **кінцевого варіанту**. Номер журналу, в якому публікуються подані матеріали, визначається редакцією журналу. До друку приймаються рукописи, які раніше не були опубліковані в друкованих та електронних виданнях. Передрук та інше використання публікацій журналу здійснюється тільки за погодженням з редакцією та обов'язковим посиланням на джерело.

ПОСЛІДОВНІСТЬ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТАТТІ:

УДК: Times New Roman, кегль – 12 pt, без абзацу, міжрядковий інтервал – 1, вирівнювання по лівому краю, прописними літерами;

ПРІЗВИЩЕ ІМ'Я по-БАТЬКОВІ автора (-ів): Times New Roman, кегль – 12 pt, з абзацним відступом – 0,5 см, міжрядковий інтервал – 1, прописні, вирівнювання по лівому краю;

Назва установи (закладу): Times New Roman, кегль – 11 pt, міжрядковий інтервал – 1, з абзацним відступом – 0,5 см, вирівнювання по лівому краю;

НАЗВА СТАТТІ: Times New Roman, кегль – 12 pt, міжрядковий інтервал – 1, прописні, напівжирні, з абзацним відступом – 0,5 см, вирівнювання по лівому краю.

Порожній рядок.

Анотація до статті **українською** мовою: Times New Roman, кегль – 11 pt, курсив, з абзацним відступом – 1,25 см, міжрядковий інтервал – 1, вирівнювання по ширині, назва рубрик – напівжирним;

Анотація (UA) не менше 1800 знаків. Рубрики анотації: Мета. Методика. Результати. Наукова новизна. Практична значимість.

Ключові слова анотації **українською** мовою: назва – **напівжирний курсив**, Times New Roman, кегль – 11 pt, міжрядковий інтервал – 1, з абзацним відступом – 1,25 см.; перелік ключових слів: 5–6 слів чи словосполучень, Times New Roman, кегль – 11 pt, вирівнювання по ширині;

Порожній рядок.

Основний текст статті: Times New Roman, кегль – 12 pt, міжрядковий інтервал – 1, з абзацним відступом – 1,25 см., вирівнювання по ширині.

Наукова стаття передбачає таку **послідовність** структурних елементів **текстової частини**:

– **Вступ** – постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями (5–10 рядків); актуальність і доцільність питання (5–10 рядків); останні дослідження та публікації, на які спирається автор, виділення невирішених частин загальної проблеми, котрим присвячується дана стаття (звичайно ця частина статті становить близько 1/3 сторінки).

– **Постановка завдання** – формулювання цілей статті. Вказаний розділ вельми важливий, бо з нього читач визначає корисність для себе пропонованої статті; мета статті впливає з постановки загальної проблеми і огляду раніше виконаних досліджень, тобто дана стаття має на меті ліквідувати “білі плями” у загальній проблемі (обсяг цієї частини статті 5–10 рядків).

– **Результати дослідження** – виклад власне матеріалу дослідження (від 5–6 сторінок тексту). Невеликий обсяг потребує виділення головного у матеріалах дослідження; іноді можна обмежитися тільки формулюванням мети дослідження, короткою згадкою про метод вирішення задачі і викладом отриманих результатів; якщо на обсяг статті не має суворих обмежень, то доцільно описати методику дослідження повніше.

– **Висновки** – у закінченні наводяться висновки з даного дослідження і стисло подаються перспективи подальших розвідок у цьому напрямку.

Таблиця: Times New Roman, кегль – 12 pt, міжрядковий інтервал – 1, вирівнювання по центру, без абзацу. Згадана в тексті таблиця позначається скорочено (табл. 4). Всі таблиці, якщо їх декілька, нумерують арабськими цифрами в межах всього тексту: *Таблиця 1, Таблиця 2, ..., тощо*. Таблиці забезпечують тематичними заголовками, які розташовують з лівого боку сторінки перед таблицею і пишуть з прописної букви, *курсивом*, без крапки на кінці.

Вміст таблиці: Times New Roman 10/12pt, інтервал 1. Якщо цифрові або інші дані в певному елементі таблиці не подають, там обов'язково ставлять прочерк. У разі потреби таблиця забезпечується примітками, що поміщаються під таблицею. При перенесенні таблиці на наступну сторінку слід пронумерувати граfi і продовжити їх нумерацію. Нову сторінку почати зі слів «*Продовження табл. 1»*. Заголовок таблиці не повторюють.

Після таблиці – порожній рядок.

Рисунки (діаграми, фото та ін.) подаються у кольоровому та чорно-білому зображенні разом із текстом у місцях посилань на них та обов'язково в окремих файлах (*.TIFF, *.jpg та ін.) з роздільністю 300 dpi. Бажана ширина рисунків – 9 см або не більше 17 см для карт, схем та інших об'ємних матеріалів. Рисунок має бути розташований по центру, **без обтікання текстом**. Рисунки розміщують „в тексті“, (не в таблицях). Символи, підписи, лінії рисунків слід виконувати таким чином, щоб вони сприймалися. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті.

У тексті на ілюстрацію робляться посилання, що містять порядкові номери, під якими ілюстрації поміщені в статті. Всі ілюстрації, якщо їх декілька, нумерують арабськими цифрами в межах всього тексту: рис. 1, рис. 2, ..., тощо. Якщо в тексті тільки одна ілюстрація, то номер їй не привласнюється і слово «*рисунок*» не пишуть. Ілюстрації забезпечують тематичними заголовками, які розташовують посередині сторінки після рисунку і пишуть з прописної букви, **напівжирним**, без крапки на кінці. Кожну ілюстрацію необхідно забезпечувати підписом, знизу ілюстрації, розкриваючи його зміст, який повинен відповідати основному тексту і самій ілюстрації. В підписі дається, також, розшифровка умовних позначень (цифрових та буквених).

Після ілюстрації – порожній рядок.

Формули в статтях мають бути набрані за допомогою редактора формул (внутрішній редактор формул в редакторі Microsoft Word for Windows). Прості формули та символи, що їх складають, набираються за допомогою редактора формул, стиль – математичний (курсив), розмір формул – 10 pt. Складні формули набирають у редакторі Microsoft Equation. Формули завдовжки понад 8 см розбивають на окремі блоки до 8 см (за окремими винятками – 17 см). Формули відокремлюють від тексту зверху та знизу одним інтервалом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Усі *фізичні величини* подаються в системі СІ. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою. Формули набираються в редакторі формул **MathType** та розташовуються по центру (без абзацу) рядка, нумерація цифрова, наскрізна. Номер формули (у круглих дужках, Times New Roman, кегль – 12 pt) розташовується по правому краї сторінки на одному рівні з формулою. Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів розташовують безпосередньо під формулою, у тій послідовності, у якій вони представлені у формулі. Кожне значення необхідно пояснювати в новому абзаці з відступом 75 мм. Перший ряд пояснень начитають зі слова «де» (без відступу).

Список використаної літератури – елемент бібліографічного апарату, котрий містить описи використаних джерел. Список використаної літератури приводиться наприкінці статті. При цитуванні літератури в тексті необхідно вказувати номер у квадратних дужках, наприклад [1]. Нумерація літератури в порядку згадування, арабськими цифрами, дотримуючись наскрізної нумерації: Times New Roman 12 pt, міжрядковий інтервал 1, без абзацного відступу, вирівнювання по ширині.

Список джерел – не менше 10 позицій, мовами оригіналу, оформляється згідно з ДСТУ 3017: 2015. У тексті рукопису посилання на літературу ставляться в квадратні дужки.

References – Times New Roman 11 pt, міжрядковий інтервал 1,0, без абзацного відступу, вирівнювання по ширині. Транслітеровані (*транслітерація з укр. мови – <http://www.slovnyk.ua/services/translit.php>; з рос. – <http://www.fotosav.ru/services/transliteration.aspx>*) та перекладений англійською список літератури з дотриманням вимог міжнародних стандартів оформлення бібліографічних посилань.

Порожній рядок.

Анотація (RU) не менше 1800 знаків.

ФАМИЛИЯ И.О. автора (-ов): Times New Roman, кегль – 12 pt, прописні, міжрядковий інтервал – 1, без абзацу, вирівнювання по центру.

Найменування організації: Times New Roman, кегль – 11 pt, курсив, міжрядковий інтервал – 1, без абзацу, вирівнювання по центру.

НАЗВАНІЕ СТАТЬИ: Times New Roman, кегль – 12pt, міжрядковий інтервал – 1, прописні, напівжирні, без абзацу, вирівнювання по центру.

Анотація до статті російською мовою: Times New Roman, кегль – 11 pt, з абзацним відступом – 1,25 см., міжрядковий інтервал – 1, вирівнювання по ширині, назва рубрик – напівжирним.

Рубрики анотації: Цель. Методика. Результаты. Научная новизна. Практическая значимость.

Ключові слова анотації російською мовою: назва – **напівжирний**, Times New Roman, кегль – 11 pt, міжрядковий інтервал – 1, з абзацним відступом – 1,25 см.; перелік ключових слів: 5–6 слів чи словосполучень, Times New Roman, кегль – 11 pt, *курсив*, вирівнювання по ширині;

Порожній рядок.

Анотація (EN) не менше 1800 знаків.

ПРІЗВИЩЕ I. B. автора (-ов): Times New Roman, кегль – 12 pt, прописні, міжрядковий інтервал – 1, без абзацу, вирівнювання по центру.

Назва установи (закладу): Times New Roman, кегль – 11 pt, курсив, міжрядковий інтервал – 1, без абзацу, вирівнювання по центру.

НАЗВА СТАТТІ: Times New Roman, кегль – 12pt, міжрядковий інтервал – 1, прописні, напівжирні, без абзацу, вирівнювання по центру.

Анотація до статті англійською мовою: Times New Roman, кегль – 11 pt, з абзацним відступом – 1,25 см., міжрядковий інтервал – 1, вирівнювання по ширині, назва рубрик – **напівжирним**;

Рубрики анотації: Purpose. Methodology. Findings. Originality. Practical value.

Ключові слова анотації англійською мовою: назва – **напівжирний**, Times New Roman, кегль – 11 pt, міжрядковий інтервал – 1, з абзацним відступом – 1,25 см.; перелік ключових слів: 5 – 6 слів чи словосполучень, Times New Roman, кегль – 11 pt, *курсив*, вирівнювання по ширині.

Застосування автоматичного перекладу наукового тексту (статті, анотації, тощо) НЕ ДОПУСКАЄТЬСЯ. Переклад (статті, анотації, тощо) має бути належної якості.

Остаточний висновок щодо публікації схвалює редакційна колегія журналу та повідомляє автора (-ів) телефонним дзвінком або повідомленням по електронній пошті.

Редакція лишає за собою право на незначне редагування та скорочення, зберігаючи при тому головні висновки та авторську стилістику. Статті, оформлені без дотримання зазначених вимог, розглядатися не будуть.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

Комп'ютерний набір та макетування

Кривонос О. О.

Технічний редактор

Панасюк І. В.

Відповідальний за поліграфічне виконання

Пугач А. В.

Підп. до друку 26.05.2021. Формат 60×84 1/8.
Ум. друк. арк. 8,36. Облік. вид. арк. 6,54. Наклад 100 пр. Зам. 1696.

Видавець і виготовлювач Київський національний університет технологій та дизайну.
вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ, 01011, Україна.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія KB № 19330-9130ПР від 08.08.2012.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготівників і
розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 993 від 24.07.2002.

TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

Computer Typesetting & Modeling

Kryvonos O. O.

Technical Editor

Panasiuk I. V.

Responsible for printing

Puhach A. V.

Printing proof 26.05.2021. Format 60×84 1/8.
Conditional sheet 8.36. Calculated sheet 6.54. Circulation 100 copies. Order N 1696.

KNUTD Instant Printing Department.
Nemirovich-Danchenko Street, 2, Kyiv, 01011, Ukraine.

Certificate KB № 19330-9130ПР, 08.08.2012.

Certificate ДК № 993, 24.07.2002.