

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

№ 2(19), 2024

DOI:10.30857/2786-5371.2024.2

Наукове фахове видання

Періодичність виходу: 6 разів на рік

Дата заснування: грудень 1999 р.

Київ 2024

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(19), 2024

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 29.06.2021 №735 (додаток 3). Категорія Б. Технічні науки. Спеціальності: 122, 131, 133, 151, 161, 132, 182, 141, 144, 171 (2018, 2020).

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. Мала Шияновська, 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»: Інформаційні технології, електроніка, механічна та електрична інженерія. 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. Мала Шияновська, 2, корп. 1, к. 1-347

тел./факс: +38 (044) 256-21-39

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну, протокол № 9 від 17.04.2024 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(19), 2024

DOI:10.30857/2786-5371.2024.2

Scientific Specialized Edition

Issued: 6 times a year

Founded: December, 1999

Kyiv 2024

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(19), 2024

The state registration of print media is KB № 24822-14762 IIP, 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: №735 dated 29.06.2021 "Technologies and Engineering" in the list of professional publications: cat. B, technical specialties – 122, 131, 133, 151, 161, 132, 182, 141, 144, 171 (from 2018, 2020).

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, Mala Shyianovska Str.

Editor-in- Chief:

Igor V. Panasiuk - Dr., professor

Deputy Editor:

Borys M. Zlotenko - Dr., professor

Executive secretary:

Olena O. Kryvonos

Scientific fields: Information technologies, electronics, mechanical and electrical engineering. 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, Mala Shyianovska Str., office 1-347

Tel./fax: +38 (044) 256-21-39

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

Recommendations from Science Council of Kyiv National University of Technologies and Design, Protocol № 9, originating date 17.04.2024.

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, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *головний редактор* (ORCID: 0000-0001-6671-4266).

Злотенко Борис Миколайович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник головного редактора* (ORCID: 0000-0002-0870-8535).

**СЕКЦІЯ: ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕЛЕКТРОНІКА,
МЕХАНІЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ**

Шведчикова Ірина Олексіївна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*. ORCID: 0000-0003-3005-7385.

Стаценко Володимир Володимирович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*. ORCID: 0000-0002-3932-792X.

Білоус Інна Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-6640-103X.

Денисюк Сергій Петрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-2134-254X.

Жуйков Валерій Якович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-3338-2426.

Міліх Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна. ORCID: 0000-0002-6176-3103.

Осипенко Володимир Васильович – доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна. ORCID: 0000-0002-1077-1461.

Суходуб Ірина Олегівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». ORCID: 0000-0002-5895-1306.

Чорний Олексій Петрович – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна. ORCID: 0000-0001-8270-3284.

Шавьолкін Олександр Олексійович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0003-3914-0812.

Andrzej Borusiewicz – D.Sc., Associate Professor, International University of Applied Sciences in Lomza, Poland, ORCID: 0000-0002-1407-7530.

Jasim Mohmed – Docent, PhD, Al-Furat Al-Awsat Technical University – Al-Musssaib Technical college, Kufa, Iraq. ORCID: 0000-0002-2983-416X.

Juraj Gerlici – Prof., Dr. Ing., University of Žilina, Slovak Republic. ORCID: 0000-0003-3928-0567.

Kateryna Kravchenko – PhD, University of Žilina, Slovak Republic. ORCID: 0000-0002-3775-6288.

Kay Berkling – Prof. Ph.D., Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW), Mosbach, Germany. ORCID: 0000-0003-1186-5678.

Mirosław Skibniewski – Prof., Ph.D., Dr.h.c., Honor. Prof., Department of Civil & Environmental Engineering A. James Clark School of Engineering University of Maryland, College Park, USA, ORCID: 0000-0002-7102-753X.

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

Галавська Людмила Євгеніївна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*. ORCID: 0000-0002-6994-6641.

Арабулі Світлана Іванівна – кандидат технічних наук, доцент, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*. ORCID 0000-0003-1049-8255 -

Гараніна Ольга Олександрівна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-4715-3851.

Кизимчук Олена Павлівна – доктор технічних наук, професор, Дрезденський технічний університет, Німеччина. ORCID: 0000-0002-8874-8931.

Очеретна Лариса – PhD, доцент, Ліберецький технічний університет, Чеська республіка. ORCID: 0000-0003-4296-410X.

Первая Наталія Володимирівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-5086-3926.

Редько Яна Володимирівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0001-7284-6898.

Славінська Алла Людвигівна – доктор технічних наук, професор, Хмельницький національний університет, Україна. ORCID: 0000-0003-0663-9422.

Хімічева Анна Іванівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-3737-7341.

СЕКЦІЯ: ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Плаван Вікторія Петрівна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*. ORCID: 0000-0001-9559-8962.

Мокроусова Олена Романівна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*. ORCID: 0000-0003-1943-8048.

Андресва Ольга Адіславівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0001-8374-2306.

Бессарабов Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0003-0637-1729.

Іщенко Олена Володимирівна – доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-9510-6005.

Кузьмінський Євген Васильович – доктор хімічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-5632-8297.

Левицький Володимир Євстахович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна. ORCID: 0000-0003-1323-1943.

Савченко Богдан Михайлович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-8636-5734.

Скорохода Володимир Йосипович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна. ORCID: 0000-0002-2352-5964.

Страшний Владислав Володимирович – доктор фармацевтичних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-9188-1821.

Хоменко Володимир Григорович – доктор технічних наук, доцент, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0003-0013-8010.

Valeika Virgilijus – professor, PhD, Department of Physical and Inorganic Chemistry, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania. ORCID: 0000-0003-4974-7626.

ЗМІСТ

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕЛЕКТРОНІКА, МЕХАНІЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

1. **ВОЛЯНИК О. Ю., КОВАЛЬОВ Ю. А., РУБАНКА М. М.**
Аналітичне дослідження технологічних параметрів трубчасто-гребневого живильника для сипких матеріалів 9
2. **ДЕШКО В. І., ЯЦЕНКО О. І., ШЕВЧЕНКО О. М., БІЛОУС І. Ю.**
Стан шелтерів для внутрішньопереміщених та мало захищених верств населення з точки зору енергоефективності та забезпечення комфортних умов 18
3. **ПЛЕШКО С. А., КОВАЛЬОВ Ю. А.**
Динаміка напружень в голці в'язальної машини при взаємодії з клином 28
4. **СМОЛЯНИНОВ В. Г., СУХОПАРА О. М.**
Визначення електромагнітних параметрів лінійного крокового пристрою 34
5. **СУХОДУБ І. О., СЕРДЕЧНИЙ П. Ю.**
Аналіз сценаріїв підвищення рівня енергетичної ефективності громадських будівель з інтеграцією ВДЕ 44
6. **ШАВЬОЛКІН О. О., ПІДГАЙНИЙ М. О.**
Вдосконалення системи управління гібридної фотоелектричної системи для самоспоживання житлового будинку з регулюванням споживання 57
7. **ШВЕДЧИКОВА І. О., ПАНАСЮК І. В.,
ДЕМІШОНКОВА С. А., СТАЦЕНКО Д. В.**
Особливості підготовки майбутніх фахівців з електричної інженерії в умовах зеленого переходу 68

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ІНДУСТРІЇ МОДИ, ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЮ, ОДЯГУ ТА ВЗУТТЯ

8. **ДМИТРИК О. М., ГАЛАВСЬКА Л. Є.**
Вплив типу плосков'язального обладнання на розривальні характеристики трикотажного матеріалу з високоміцних ниток 79

ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

9. **БУЛГАКОВ Є. С., ПУШКАРЬОВ Д. В., САВЧЕНКО Б. М.,
СОВА Н. В., СЛЄПЦОВ О. О.**
Дослідження фізико-механічних властивостей нетканих матеріалів на основі полілактиду 96
10. **ВАХІТОВ Р. А., КАЛАФАТ К. В., ТАРАН Н. А.,
БЕССАРАБОВ В. І., ВАХІТОВА Л. М.**
Вибір полімерів для застосування в промислових вогнезахисних реактивних покриттях 106
11. **МАКЄЄВА І. С., КИСЛОВА О. В., ПАТЛУН Д. В.,
ХОМЕНКО В. Г., НІКУЛІН Д. О.**
Розробка методів підвищення ефективності хімічного очищення природного графіту 117
12. **СТРАШЕНКО В. К., МИРОНЮК О. В.**
Одержання текстурованих поверхонь полімерних матеріалів з використання металевих шаблонів 125

TABLE OF CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES, ELECTRONICS, MECHANICAL AND ELECTRICAL ENGINEERING

1. **VOLIANYK O. Y., KOVALEV Yu. A., RUBANKA M. M.**
 Analytical study of the technological parameters of the tubular-comb feeder for fluid materials 9
2. **DESHKO V. I., YATSENKO O. I., SHEVCHENKO O. M., BILOUS I. Y.**
 Shelters for internally displaced and vulnerable persons from the energy efficiency and comfort points of view 18
3. **PLESHKO S. A., KOVALIOV Yu. A.**
 Dynamics of stress in the needle of a knitting machine when interacting with a wedge 28
4. **SMOLIANINOV V. G., SUKHOPARA O. M.**
 Determination of electromagnetic parameters of a linear stepper device 34
5. **SUKHODUB I. O., SERDECHNYI P. Yu.**
 Analysis of scenarios for increasing the level of energy efficiency of public buildings with integration of res 44
6. **SHAVOLKIN O. O., PIDHAINYI M. O.**
 Improvement of the control system of a hybrid photovoltaic system for self-consumption of a residential building with consumption regulation 57
7. **SHVEDCHYKOVA I. O., PANASIUK I. V.,
DEMISHONKOVA S. A., STATSENKO D. V.**
 Features of the training of future specialists in electrical engineering in the conditions of the green transition 68

MATERIAL SCIENCE IN THE TEXTILE, CLOTHING AND FOOTWEAR MANUFACTURING INDUSTRIES

8. **DMYTRYK O. M, HALAVSKA L. Ye.**
 Study of the influence of flat knitting equipment type on the breaking load and elongation of knitted fabric made from high-strength threads 79

CHEMICAL AND BIOPHARMACEUTICAL TECHNOLOGIES

9. **BULHAKOV Y. S., PUSHKARYOV D. V., SAVCENKO B. M.,
SOVA N. V., SLIEPTSOV O. O.**
 Research of physical and mechanical properties nonwoven materials based on polylactic acid 96
10. **VAKHITOV R. A., KALAFAT K. V., TARAN N. A.,
BESSARABOV V. I., VAKHITOVA L. M.**
 Polymers for application in industrial fire retardant reactive coatings 106
11. **MAKYEYEVA I. S., KYSLOVA O. V., PATLUN D. V.,
KHOMENKO V.G., NIKULIN D. O.**
 Development of methods for improving the efficiency of natural graphite chemical purification 117
12. **STRASHENKO V. K., MYRONYUK O. V.**
 Getting textured surfaces of polymer materials using metal templates 125

УДК 621.8

ВОЛЯНИК О. Ю., КОВАЛЬОВ Ю. А., РУБАНКА М. М.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРУБЧАСТО-ГРЕБНЕВОГО ЖИВИЛЬНИКА ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Метою роботи є аналітичне дослідження кута нахилу трубчасто-гребневого живильника на розподілення сипкого матеріалу в трубі.

Об'єктом дослідження є процес транспортування сипких матеріалів в трубно-гребневому живильнику.

Методика. Аналітичний огляд літературних джерел. Аналітичні та експериментальні дослідження залежності кута нахилу на розподілення сипкого матеріалу в трубі живильника, дослідження конструктивних та технологічних параметрів живильника з урахуванням фізичних властивостей сипкого матеріалу.

Результати досліджень. Визначено критичний кут нахилу труби, при якому сипкий матеріал всипається з труби без її обертання. Розроблено математичну модель транспортування матеріалу з урахуванням параметрів живильника. Визначено ефективні кут нахилу в залежності від фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу. Отримано залежності кута нахилу живильника від розподілення сипкого матеріалу в трубі. Проведено аналіз розсіпання сипкого матеріалу в трубі з урахуванням конструктивних параметрів та властивостей сипкого матеріалу. Результати аналітичних розрахунків підтверджено експериментально.

Наукова новизна. Розроблено математичну модель, яка враховує фізичні властивості матеріалу, геометрію живильника та робочі параметри. Вона дозволила описати процес розсіпання сипкого матеріалу в трубі живильника та визначити значення критичного кута нахилу, який забезпечить ефективну роботу трубчасто-гребневого живильника.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для підвищення функціональності трубно-гребневих живильників у промислових процесах, де використовуються сипкі матеріали. Результати досліджень представлено у вигляді графіків залежності кута нахилу живильника від розподілення сипкого матеріалу в трубі. Це дозволяє більш точніше прогнозувати габарити транспортувального елемента в залежності від технічного процесу.

Ключові слова: аналітичне дослідження; трубно-гребневий живильник; кут нахилу; сипкі матеріали; транспортування; витікання; розсіпання; ефективність; промислові процеси; проектування систем; вдосконалення систем.

Вступ. Основною функцією живильника є транспортування сипкого матеріалу (наприклад, порошку або грануляту) від бункера до змішувача [6, 7] для виготовлення продукту відповідної якості. Живильники використовуються у різних галузях промисловості, де якісне транспортування сипких матеріалів є ключовим етапом виробничого процесу [3].

Живильники дозволяють регулювати кількість матеріалу, що подається, і змінювати її в залежності від вимог виробництва [8]. Це дозволяє підтримувати стабільність та якість виробництва, уникати витрат матеріалу та забезпечувати економічну ефективність процесу.

Одним з видів живильників є трубно-гребневі живильники, які використовуються для транспортування сипких матеріалів. Вони забезпечують безперервне постачання матеріалу з використанням принципу обертання труби на стінках якої розташовані гребні (спіральні витки).

Постановка задачі. Задачею цієї роботи є аналітичне дослідження впливу кута нахилу живильника на довжину розсіпання сипкого матеріалу в трубі.

Мета полягає у визначенні значень параметрів транспортувального елементу трубчасто-гребневого живильника, при яких досягається максимальна продуктивність процесу транспортування. При цьому необхідно:

1) розробити математичну модель трубно-гребневого живильника, враховуючи взаємодію матеріалу з органом транспортування. Встановити залежності між кутом нахилу транспортувального елементу та розсіпанням сипкого матеріалу в ньому;

2) встановити ефективні значення кута нахилу живильника, при яких досягається найвища продуктивність процесу транспортування;

3) проаналізувати результати та зробити висновки щодо раціональних параметрів трубчасто-гребневого живильника.

Результати досліджень.

В даній роботі розглядаються трубно-гребневий живильник [1, 7], який має трубу з довжиною L_T та діаметром D_T , в середині якої розташовані гребні на бічних поверхнях труби на відстані L_B (рисунок 1). Переміщення матеріалу відбувається за рахунок взаємодії зсипання (скоочування) матеріалу по поверхні гребня. Для зміни кількості матеріалу що виходить з живильника, змінюється її кутова швидкість та кут нахилу живильника. В роботі наведено результати комп'ютерного моделювання для визначення критичного кута нахилу живильника та порівняння їх з показниками отриманими експериментально[2].

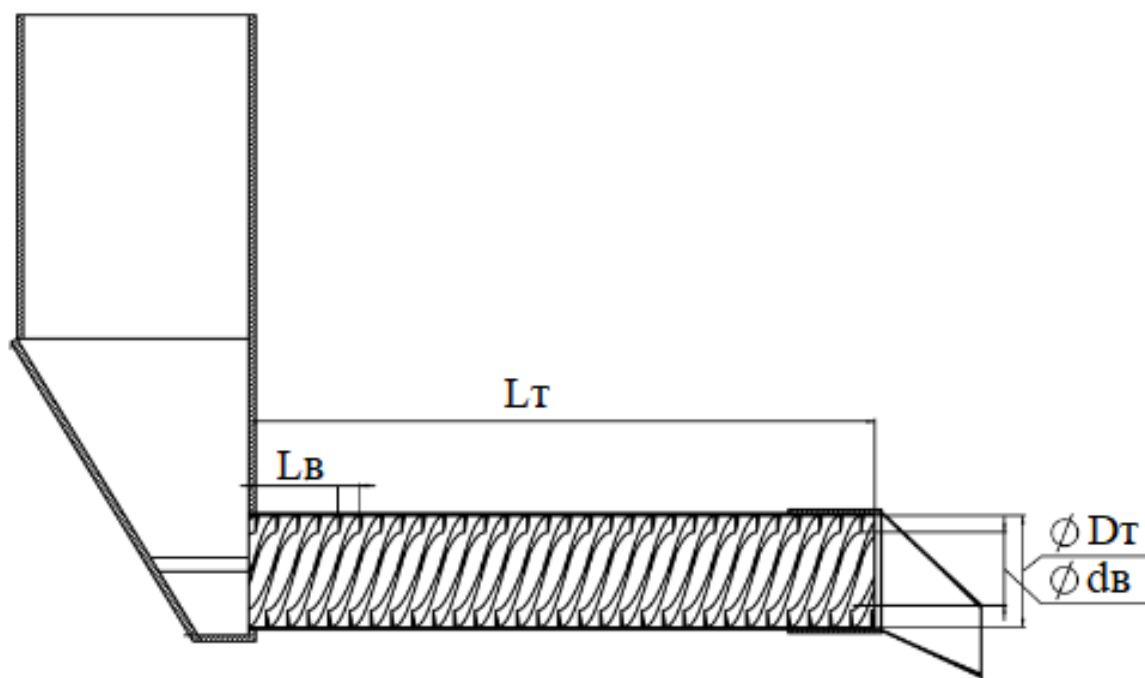


Рис. 1. Схема трубчасто-гребневого живильника

Основною вхідною характеристикою сипкого матеріалу під час досліджень є кут природного відкосу [1, 9]:

Кут природного відкосу – це найбільший кут, який може утворитися природним насипанням сипкого матеріалу у стані рівноваги з горизонтальною площиною. Кут природного відкосу залежить від фізико-механічних властивостей часток, таких як розмір, форма, густина, поверхневий стан та вологість.

Зі зменшенням розміру частинок кут природного відкосу стає меншим, оскільки дрібніші частинки мають менше зчеплення між собою і легше переміщуються одна відносно одної. Для сипких матеріалів, які не мають зчеплення (тобто, без когезії), кут природного відкосу не перевищує кута внутрішнього тертя між частинками. Це означає, що частинки можуть переміщуватися одна відносно одної до тих пір, поки кут нахилу поверхні не досягне цього критичного значення.

Кут природного відкосу можна визначити транспортером або за допомогою спеціалізованих приладів, які вимірюють нахил поверхні матеріалу в стані рівноваги. Крім того, його можна розрахувати за допомогою математичних формул, враховуючи фізичні властивості часток. Однією з таких формул є:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{h}{l},$$

де h – висота насипаного сипкого матеріалу;
 l – довжина розсипання сипкого матеріалу.

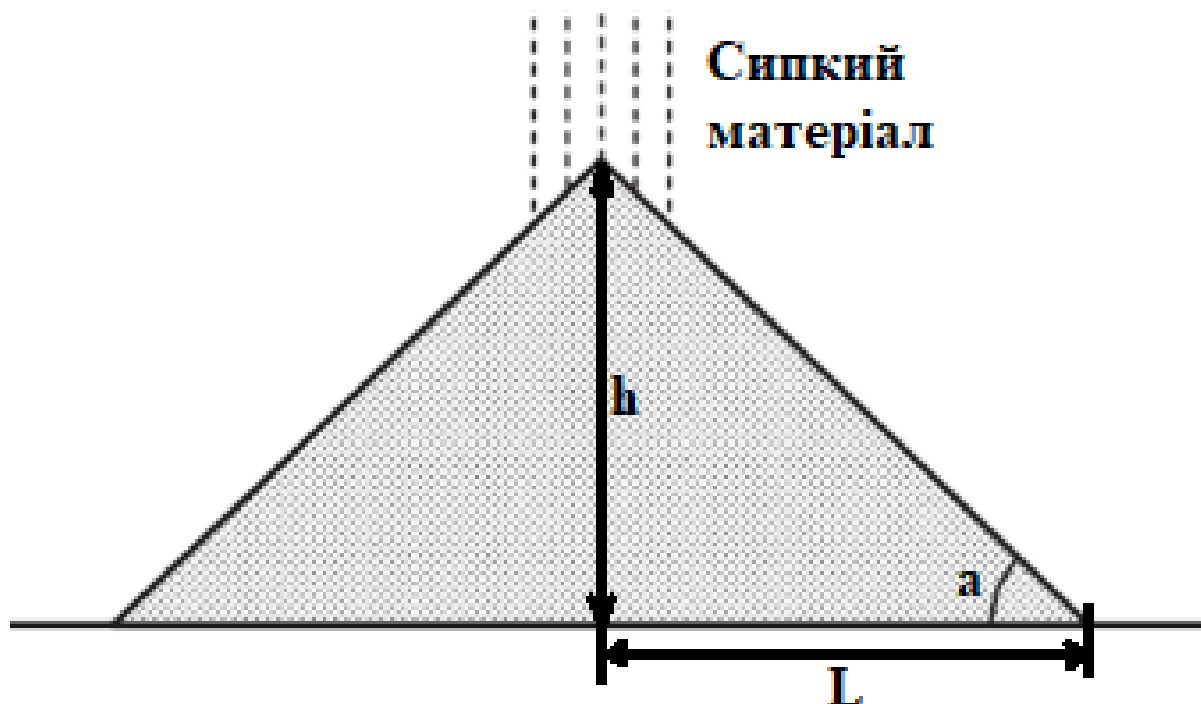


Рис. 2. Схема конуса який утворює насипний матеріал

Оскільки в трубі присутні гребні які затримують сипкий матеріал під час руху кут природного відкосу не буде дорівнювати критичному куту висипання з труби.

Програмне забезпечення в якому побудована модель не дозволяє змінювати кут нахилу живильника, для того щоб забезпечити ефект нахилу труби під час дослідження сила тяжіння по осі X збільшувалась а осі Y зменшувалась, при цьому їх результуюча дорівнює завжди має дорівнювати $9,8 \text{ м/с}^2$ (рис. 3).

На рисунку 3 зображено модель трубно-гребневого живильника.

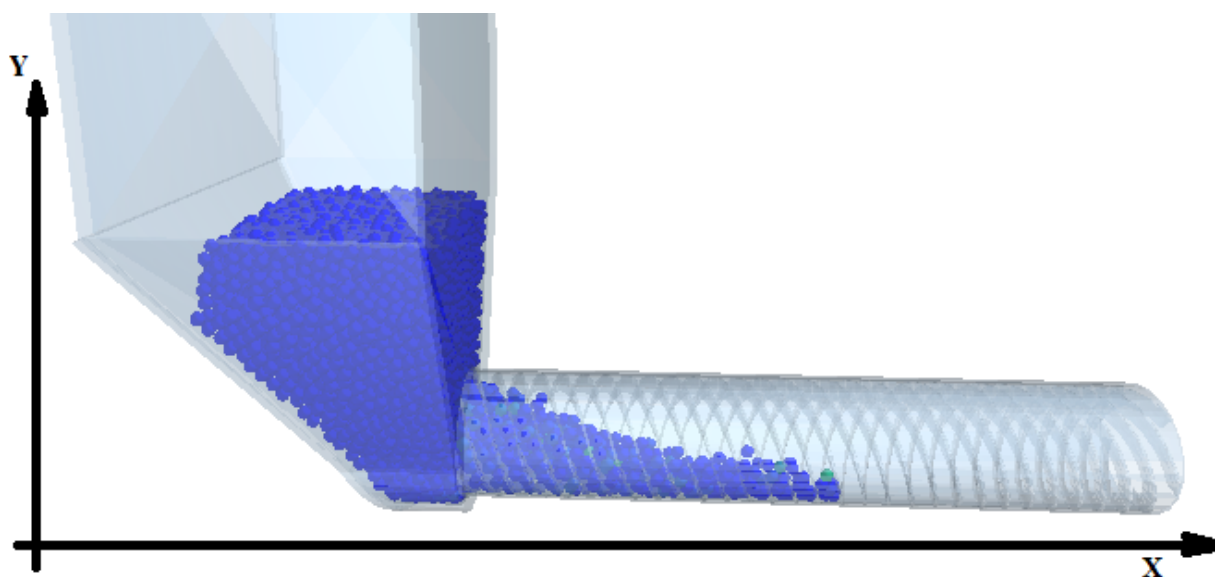


Рис. 3. Модель переміщення сипкого матеріалу у трубчасто-гребневому живильнику

Дані які обрано для експериментальних досліджень приведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

Номер експерименту №	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення кута нахилу живильника β	10	15	20	25	30	35	40	45
Значення сили тяжіння по осі X	1,08	1,63	2,17	2,72	3,26	3,81	4,35	4,9
Значення сили тяжіння по осі Y	8,71	8,16	7,62	7,07	6,53	5,98	5,44	4,9

Довжина розсіпання сипкого матеріалу в лабораторній установці визначався різницею між загальною довжиною труби L_T та відстанню від її кінця до першої частинки сипкого матеріалу яка утворює кут природнього відкосу L_3 . Кут нахилу живильника встановлювався за допомогою транспортера який розташований на лабораторній установці [1] (рис. 4).

Для експерименту обрано гранули полівінілхлориду (ПВХ) характеристики якого (таблиця 2) були задані в модель дослідження. Цей матеріал був обраний через значну насипну густину 1200 кг/м^3 , це дозволить знизити вплив електростатичної сили між сипким матеріалом та транспортувальним елементом живильника та як наслідок підвище достовірність проведених експериментів на лабораторному стенді. Оскільки форма частинки ПВХ має переважно округлу форму, доцільним рішенням буде спростити форму в математичній моделі до сферичної (рис. 5). Це дозволить збільшити швидкість обрахунку завдяки зниженню складності геометричних розрахунків та більш ефективному використанню ресурсів комп'ютерного моделювання. Сферична форма є простою для математичного опису, що

сприяє точності розрахунків та зменшує кількість ітерацій, необхідних для досягнення стабільного результату.

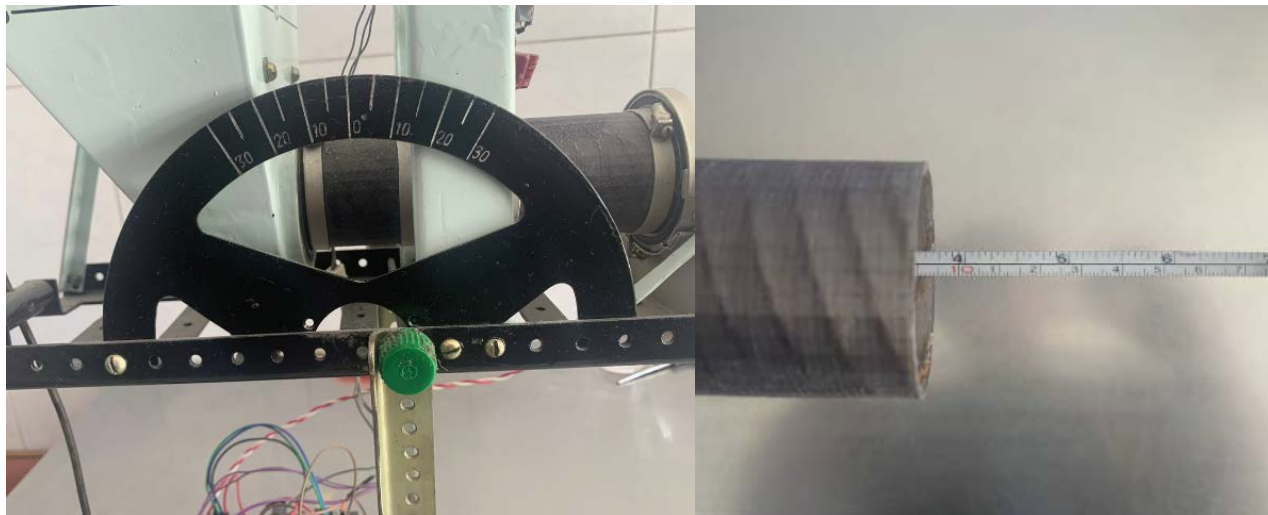


Рис. 4. Лабораторна установка для проведення експериментальних досліджень

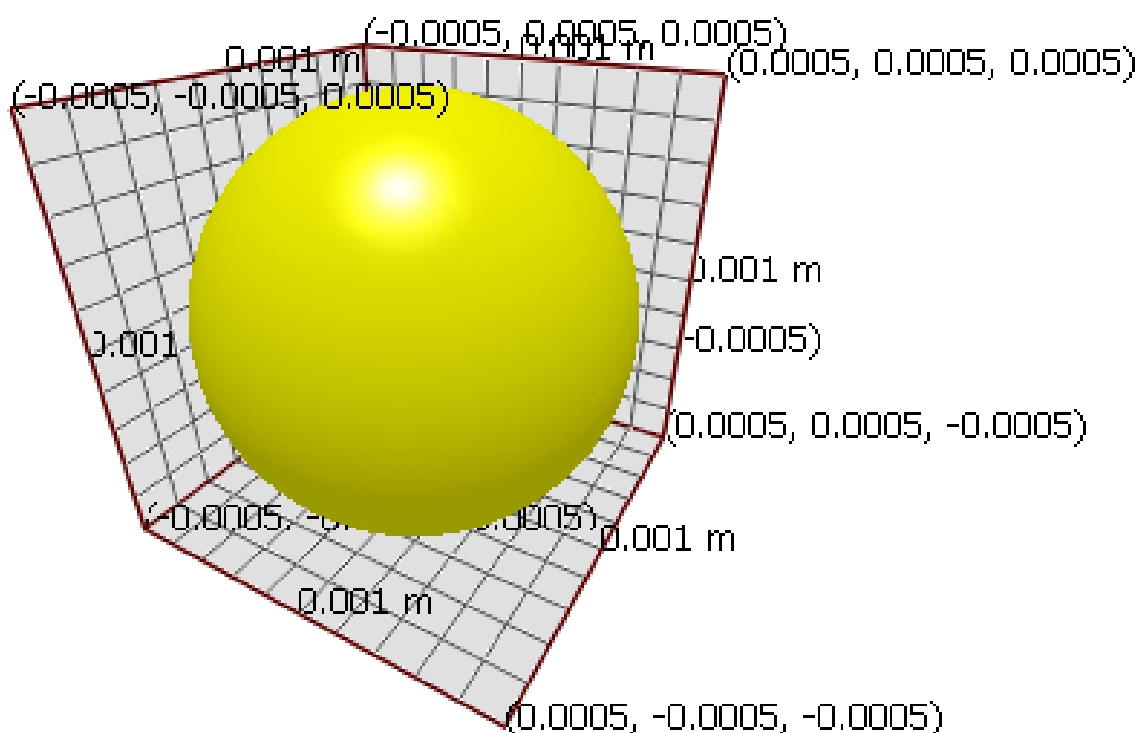


Рис. 5. Загальний вигляд частинки сипкого матеріалу математичної моделі

Характеристики живильника та властивості сипкого матеріалу, який було обрано для досліджень приведено в таблиці 2.

Результати аналітичних та експериментальних досліджень зображено на рис. 6.

Таблиця 2

Характеристики живильника та властивості сипкого матеріалу

Довжина труби живильника Lt, м.	Діаметр труби живильник а Dt, м.	Насипна густина сипкого матеріалу ρ кг/м ³	Вага однієї частинки $m_{\text{ч}}$, кг	Величина частинок $d_{\text{ч}}$, м	Кут природнього відкосу α , град.
0,22	0,05	1200	6.29×10^{-7}	0.0009-0.0011	30



Рис. 6. Залежність продуктивності від кутової швидкості труби під час транспортування сипкого матеріалу

Отримані аналітичні та експериментальні залежності відображають характер розсипання сипкого матеріалу в трубі живильника і можуть використовуватися при виборі основних конструктивних характеристик живильника. Пунктирними лініями відображено точки початку самостійного витоку сипкого матеріалу з труби, для експерименту початок витоку починається при 40 градусах а для моделі 35 градусів нахилу живильника. Також разом з цим точки залежності, отримані за допомогою математичної моделі, мають більш лінійних характер, перша точка розсипання починається з 0.110 м а початок висипання з труби починається при 35 град. Це пов'язано з тим що математична модель забезпечує ідеальні умови розсипання сипкого матеріалу за рахунок відсутності електростатичних сил які виникають під час руху сипкого матеріалу, відсутність злежуваності сипкого матеріалу та ідеальності форми частинок що в свою чергу зменшую внутрішнє тертя сипкого матеріалу.

Висновок:

1. В роботі проведено аналіз та аналітичне дослідження розсипання сипкого матеріалу в трубі в залежності від кута нахилу живильника, призначеного для транспортування сипких матеріалів.
2. При заданих параметрах визначено критичний кут нахилу труби, при якому матеріал починає постійно висипатися з труби.

3. Розроблено математичну модель, яка враховує конструктивні та технічні параметри живильника, и описує процес розсіпання сипкого матеріалу в трубі.

4. Застосування розробленої моделі дозволяє визначити ефективні значення критичного кута нахилу труби для в залежності від габаритів труби.

5. Результати досліджень дозволять більш раціонально підбирати геометричні розміри транспортувального елемента живильника.

References

1. Nychehlod, V., Burmistenkov, O., Statsenko, V., Bila, T., Statsenko, D. (2023). Determining the pattern of loose material movement in screw and tubular-comb feeders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1 (126)), 22–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291680>.
2. Antomonov, M. Yu., Korobeynikov, G. V., Khmelnytska, I. V. (2021). Matematychni metody obrobлення ta modeliuvannia rezultativ eksperymentalnykh doslidzhen [Mathematical methods for processing and modeling experimental research results]. *Olympiyska Literatura*. 216 p. [in Ukrainian].
3. Bila, T. Ya., Statsenko, V. V. (2006). Kompiuterne modeliuvannia systemy avtomatychnoho keruvannia zmishuvachem bezperervnoi dii [Computer modeling of continuous-action mixer automatic control system]. *Visnyk of the Daliian University = Bulletin of SNU named after Dalia*, 1, 9–12 [in Ukrainian].
4. Tsyz, I. Ye., Didukh, V. F. (2017). Dozuvannia syppykh zv'iaznykh materialiv pid chas vyrobnytstva orhano-mineralnykh dobryv: monohrafiia [Dosage of bulk binders in the production of organo-mineral fertilizers: monograph]. *Lutsk: RVV Lutsk NTU*. 184 p. [in Ukrainian].
5. Borovik, V. N., Yakovets, V. P. (2004). Kurs vyshchoi heometrii: navch. posibnyk [Higher Geometry Course]. *Sumy: VTD "Universitetska Kniga"*. 464 p. [in Ukrainian].
6. Polischuk, O. S., Karmalita, A. K., Burmistenkov, O. P. (2018). Polimerni materialy dlia vyrobnytstva vyrobiv lehkoï promyslovosti ta yikh fizyko-mekhanichni vlastyvosti [Polymer materials for light industry products manufacturing and their physico-mechanical properties]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of Khmelnytskyi National University* [in Ukrainian].
7. Nychehlod, V. V., Statsenko, V. V., Burmistenkov, O. P. (2023). Pulsatsii zhyvylnykyv: porivniannia konstruktsii shnekovoho ta trubchasto-hrebnevoho zhyvylnykyv [Pulsations of feeders: a comparison of screw and tubular-comb feeders designs]. *Electromechanical, Information Systems and Nanotechnology: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference*

Література

1. Nychehlod V., Burmistenkov O., Statsenko V., Bila T., Statsenko D. Determining the pattern of loose material movement in screw and tubular-comb feeders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 6 (1 (126)). P. 22–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291680>.
2. Антомонов М. Ю., Коробейніков Г. В., Хмельницька І. В. Математичні методи оброблення та моделювання результатів експериментальних досліджень. Олімпійська література, 2021. 216 с.
3. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування змішувачем безперервної дії. *Вісник ЧНУ ім. Даля*. 2006. № 1. С. 9–12.
4. Цизь І. Є., Дідух В. Ф. Дозування сипких зв'язних матеріалів під час виробництва орґано-мінеральних добрив: моноґрафія. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. 184 с.
5. Боровик В. Н., Яковець В. П. Курс вищої геометрії: навч. посібник. Суми: ВТД "Університетська книга", 2004. 464 с.
6. Поліщук О. С., Кармаліта А. К., Бурмістенков О. П. Полімерні матеріали для виробництва виробів легкої промисловості та їх фізико-механічні властивості. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018.
7. Ничеглод В. В., Стаценко В. В., Бурмістенков О. П. Пульсації живильників: порівняння конструкцій шнекового та трубчасто-гребневого живильників. *Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології: матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної*

of Young Scientists and Students, April 20, 2023, Kyiv (pp. 20–23). Kyiv: KNUTD [in Ukrainian].

8. Rohatynskyi, R. M. (1997). Doslidzhennia protsesiv transportuvannia vantazhiv mobilnymy hvyntovymy konveieramy [Research of cargo transportation processes by mobile screw conveyors]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho ahrarnoho universytetu "Suchasni problemy silskohospodarskoho mashynobuduvannia" = Collection of Scientific Works of the National Agrarian University "Modern Problems of Agricultural Engineering"*, 1, 69–73[in Ukrainian].

9. Zalutskyi, S. Z., Gevko, R. B., Gladio, Y. B., Tkachenko, I. G., Klendiy, O. M. (2018). Rukh potoku sypkoho materialu po poverkhni shneka z elastychnymy sektiiami, shcho perekryvaiutsia mizh soboiu [Movement of bulk material flow on the surface of a screw with overlapping elastic sections]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv = Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, 11, 81–90 [in Ukrainian].

Інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Київ, 20 квітня 2023 року. Київ: КНУТД, 2023. С. 20–23.

8. Рогатинський Р. М. Дослідження процесів транспортування вантажів мобільними гвинтовими конвеєрами. *Збірник наукових праць Національного аграрного університету "Сучасні проблеми сільськогосподарського машинобудування"*. Київ: Видавництво НАУ, 1997. Том 1. С. 69–73.

9. Залуцький С. З., Гевко Р. Б., Гладько Ю. Б., Ткаченко І. Г., Клендій О. М. Рух потоку сипкого матеріалу по поверхні шнека з еластичними секціями, що перекриваються між собою. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 11. С. 81–90.

VOLIANYK OLEKSII

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Head of Department of Mechanical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7278-0910>
Scopus Author ID: 57915800600
Researcher ID: I-7967-2018
E-mail: volianyko.oy@knutd.edu.ua

KOVALEV Yu

Candidate of Sciences in Engineering (PhD), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2321-6763>
Scopus Author ID: 57221091874
Researcher ID: AAP-5469-2021
E-mail: kovalov.ya@knutd.edu.ua

RUBANKA M

Candidate of Sciences in Engineering (PhD), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2367-0333>
Scopus Author ID: 57200296022
Researcher ID: AAN-2604-2021
E-mail: rubanka.mm@knutd.edu.ua

VOLIANYK O. Y., KOVALEV Yu. A., RUBANKA M. M.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

ANALYTICAL STUDY OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE TUBULAR-COMB FEEDER FOR FLUID MATERIALS

Purpose: The purpose of this work is to analytically study the angle of inclination of a tubular-crest feeder on the distribution of bulk material in the tube.

Object of study: The object of the study is the process of transporting bulk materials in a tubular-crest feeder.

Methodology: Analytical review of literature sources. Analytical and experimental studies of the dependence of the angle of inclination on the distribution of bulk material in the feeder tube, studying the structural and technological parameters of the feeder taking into account the physical properties of the bulk material.

Research results: The critical angle of inclination of the tube has been determined, at which the bulk material falls out of the tube without its rotation. A mathematical model of material transportation has been developed taking into account the parameters of the feeder. Effective angles of inclination have been determined depending on the physical and mechanical properties of the bulk material. Dependencies of the feeder's inclination angle on the distribution of bulk material in the tube have been obtained. An analysis of the spreading of bulk material in the tube considering the structural parameters and properties of the bulk material has been conducted. The results of analytical calculations have been experimentally confirmed.

Scientific novelty: A mathematical model has been developed that takes into account the physical properties of the material, the geometry of the feeder, and the operating parameters. It allows describing the process of spreading bulk material in the feeder tube and determining the critical angle of inclination that ensures the efficient operation of the tubular-crest feeder.

Practical significance: The obtained results can be used to enhance the functionality of tubular-crest feeders in industrial processes where bulk materials are used. The research results are presented in the form of graphs showing the dependence of the feeder's inclination angle on the distribution of bulk material in the tube. This allows for more accurate prediction of the dimensions of the transportation element depending on the technical process.

Keywords: Analytical study, tubular-crest feeder, angle of inclination, bulk materials, transportation, outflow, spreading, efficiency, industrial processes, system design, system improvement.

УДК 644.1

ДЕШКО В. І., ЯЦЕНКО О. І., ШЕВЧЕНКО О. М., БІЛОУС І. Ю.

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

СТАН ШЕЛТЕРІВ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОПЕРЕМІЩЕНИХ ТА МАЛОЗАХИЩЕНИХ ВЕРСТВ НАСЕЛЕННЯ З ТОЧКИ ЗОРУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМФОРТНИХ УМОВ

Мета. Аналіз фактичного стану прихистків для тимчасового проживання внутрішньо переміщених та малозахищених верств населення, а також визначення шляхів підвищення рівня комфортності та енергоефективності шелтерів.

Методика. Первинне обстеження шелтерів, розміщених в різних областях України, для аналізу їх поточного стану з точки зору забезпечення умов комфортності та енергоефективності, проводилось на місцях, методами спостереження та опитування. Більшість прихистків входять до складу будівель та не є самостійними об'єктами будівництва. Тож для них визначалися приведені опори теплопередачі огорожувальних конструкцій за ДСТУ 9191:2022 [1] та енергоефективність інженерних систем згідно з ДСТУ EN 15232-1:2017 [2].

Результати. За результатами обстеження сформовано пропозиції для забезпечення та підвищення комфортних та енергоефективних умов у шелтерах. У роботі також висвітлено аспекти, які потребують спільних зусиль влади, громадських організацій та міжнародних донорів для покращення умов проживання в прихистках.

Наукова новизна. Враховуючи не достатню кількість досліджень стану шелтерів у Європі, та актуалізацію цих питань для України в останні два роки, проведений аналіз є новим та своєчасним тому що рівень теплового комфорту в житлових приміщеннях має значний вплив на емоційний та фізичний стан мешканців.

Практична значимість. В опалювальний період та в умовах масових ворожих атак на енергетичну інфраструктуру України важливими є питання забезпечення комфортного та енергоефективного мікроклімату в прихистках для внутрішньопереміщених та малозахищених верств населення. Проведене дослідження засвідчило актуальність проблеми енергоефективності шелтерів в Україні.

Ключові слова: прихистки; шелтери; внутрішньо переміщені особи; тепловий комфорт; енергозбереження.

Вступ. З початком повномасштабного вторгнення в лютому 2022 року Україна зіткнулася з масовою вимушеною зовнішньою та внутрішньою міграцією. За даними УВКБ ООН більше 6 млн українців виїхали за кордон та наразі перебувають там. Статус внутрішньо переміщених осіб (ВПО) мають близько 4,9 млн осіб за даними Міністерства соціальної політики. Дослідження динаміки показує, що за останні пів року кількість ВПО практично не змінилася, зменшившись лише на 21 тис. осіб. Аналітичний центр Cedos, який працює над моніторингом впливу війни на переміщення населення всередині країни, припускає, що переміщення людей всередині країни відбувається хвилями, залежно від наявності бойових дій у регіоні чи населеному пункті [3]. За даними Центру протидії дезінформації при РНБО станом на шостий місяць від початку повномасштабного вторгнення понад 3,5 млн осіб (8% населення країни) втратили власне житло. Така ситуація потребує наявності доступних прихистків для внутрішньо переміщених осіб (ВПО) – шелтерів, які до повномасштабного вторгнення слугували переважно прихистками для малозахищених верств населення.

Основними критеріями шелтерів є:

- можливість потрапити туди швидко у важкій ситуації;
- безкоштовність та неприбутковість;

- фіксований період проживання;
- можливість отримати комплексну допомогу (психологічну, медичну, юридичну).

Слід зауважити, що в українських містах майже відсутні шелтери, які повністю відповідали б зазначеним характеристикам. Замість цього, наявні кризові центри, будинки соціального піклування, центри обліку та нічного перебування бездомних, центри ресоціалізації та притулки для жінок, які стали жертвами насильства. Ці установи не тільки різняться за назвою, але й мають власні правила прийому та перебування для своїх мешканців. Діяльність цих закладів регулюється різними органами влади, які встановлюють перелік необхідних документів і критерії для прийому осіб.

Аналіз попередніх досліджень. Важливо зазначити, що доступність та якість шелтерів може сильно відрізнятися залежно від конкретного регіону та рівня владних зусиль. Деякі міста та області мають більше ресурсів для створення та утримання шелтерів, тоді як інші, особливо ті, що знаходяться недалеко від зон бойових дій, можуть мати обмежену доступність та функціональність. За оцінками Міжнародної організації з міграції у 2022 році найбільша частка людей переїхала до західного макрорегіону. На сайті благодійної організації Eleos-Ukraine [4] можна знайти карту розміщення шелтерів по всій території України, на якій видно, що більшість прихистків розміщені саме в західних областях країни.

З початком масштабної війни значна частина прихистків були облаштовані з нуля, так як існуючі шелтери для малозахищених верств населення не мали можливості прийняти потік переселенців. Спершу, для поселення внутрішньо переміщених осіб використовувалися будівлі закладів освіти, проте перед відновленням навчального процесу виникла необхідність у облаштуванні нових прихистків. Громади почали активно звертатися до міжнародних організацій та експертів, щоб знайти ресурси для організації шелтерів для переселенців.

Попри обмеженість місцевих бюджетів, існує багато проєктів, які впроваджуються в межах підтримки України іншими країнами, міжнародними донорами та благодійними організаціями. Для участі та отримання фінансування територіальні громади розробляють проєктні заявки на гранти міжнародних організацій та фондів. Наприклад, у Косівській громаді на Івано-Франківщині, офіційне населення якої зросло майже на 20%, за підтримки Програми «U-LEAD з Європою» влітку 2023 року було розроблено грантову заявку й отримано кошти на обладнання прихистку для 40 людей [5]. Завдяки цьому фінансуванню до будівлі було підведено центральне водопостачання та каналізацію, замінено систему опалення, автоматику газового котла, електричну мережу, двері, утеплено горище, обладнано санвузол та кухню, зроблено косметичний ремонт. В рамках реалізації іншого проєкту «Підтримка відновлення України» в межах підтримки України Швейцарією у більш ніж десяти територіальних громадах Івано-Франківської області за останні два роки були проведені роботи щодо облаштування систем опалення, водопостачання та водовідведення, водоочисних споруд, санвузлів, кухонь, душових кімнат у шелтерах та колективних центрах, де проживають ВПО, а також у медико-соціальних закладах [6]. В рамках проєкту «Інтегрована гуманітарна відповідь в умовах війни та післявоєнного відновлення», що реалізується за фінансової підтримки Disasters Emergency Committee при координації МБФ «Альянс громадського здоров'я» в січні 2023 року у Львові було відкрито новий прихисток «Безпечне місце» для вимушених переселенців. Даний прихисток функціонує у форматі хостелу з усіма зручностями, де може розміститися 21 людина. Цікавим є те, що у даному закладі працюють лише ВПО. Даний проєкт був пілотним і на його базі розробляються загальні рекомендації щодо стандартів та правил надання подібних послуг в Україні [7].

Таким чином уряд України разом з благодійними фондами та міжнародними організаціями намагається забезпечити доступність шелтерів для населення, яке потребує захисту під час війни та поліпшення умов перебування в прихистках. Однак в силу фінансових

обмежень часто виникає проблема відсутності шелтерів та інфраструктури для захисту цивільного населення, а діючі об'єкти виявляються не облаштованими достатньо для відновлення стабільного ритму життя людей, які там перебувають. Тож звичайно, що перебування в недостатньо пристосованих умовах для життя не сприяє адаптації та психологічному розвантаженню людей, які через складні, часто травмуючі, обставини або втрату дому змушені користуватися послугами прихистків. Тому покриття базових потреб, які полягають у забезпеченні комфортних умов, є однією з пріоритетних задач при облаштуванні шелтерів. Комфортні умови ж полягають у забезпеченні оптимального мікроклімату для життєдіяльності людей.

Більшість наявних досліджень в цій області зосереджена на взаємозв'язку між житлом і здоров'ям, але все ще бракує робіт, які б стосувалися впливу якості житла на переміщене населення. Деякі дослідження на дану тему проведені в публікаціях іноземних видань [8]. Огляд наявних публікацій показав, що переважна більшість таких робіт зосереджена на умовах перебування переселенців в країнах Африки, південної та південно-східної Азії. В роботі [9] було проведено огляд 122 публікацій, які пов'язані з питаннями стану навколишнього середовища вимушено переміщених осіб. Враховуючи місцезнаходження прихистків, основна увага в цих роботах приділяється питанням водопостачання (47%), каналізації (39%), густини заселення (24%), а також гігієни (21%). Лише 7 публікацій стосуються доступу до енергії та 3 – якості внутрішнього повітря. Враховуючи брак досліджень стану шелтерів в Європі та особливу актуалізацію цих питань для України в останні два роки, існує необхідність у проведенні аналізу поточного стану прихистків. Критично важливими в помірному кліматичному поясі постають проблеми теплозабезпечення та теплового комфорту.

Рівень теплового комфорту в помешканнях має великий вплив на емоційний і фізичний стан мешканців. Наприклад, низька температура або підвищений рівень вологості у житлі можуть провокувати різні проблеми зі здоров'ям людей (загострення хронічних захворювань, захворювання дихальних шляхів, втома, розвиток нових хвороб). Таким чином, для покращення здоров'я, емоційного стану та самопочуття мешканців слід забезпечувати прийнятне та комфортне середовище всередині приміщень [10].

Постановка завдання. Метою проведеного дослідження є аналіз фактичного стану прихистків для тимчасового проживання внутрішньо переміщених та малозахищених верств населення, а також визначення шляхів підвищення рівня комфортності та енергоефективності шелтерів.

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні завдання:

- обстеження шелтерів, розміщених в різних областях України для аналізу їх поточного стану з точки зору забезпечення умов комфортності та енергоефективності;
- формування пропозицій для забезпечення комфортних та енергетичних умов у шелтерах.

Матеріал та результати дослідження. У 2023 році в одинадцяти шелтерах, розміщених в різних областях України, було проведено енергетичне обстеження, метою якого було виявлення поточного стану приміщень, систем енергозабезпечення, відповідності комфортних умов всередині, а також надання рекомендацій для забезпечення умов комфортності, енергоефективності та економії витрат на енергоресурси. Місцезнаходження обстежених шелтерів представлено на мапі нижче (рис. 1). Насиченість кольору на мапі відображає загальну кількість шелтерів у конкретних областях відповідно до даних [4].

В ході енергетичного обстеження одинадцяти шелтерів було проведено:

- обстеження приміщень шелтерів: визначення існуючого стану огорожувальних конструкцій, інженерних систем, характеру використання та умов експлуатації;

- оцінку можливості реалізації енергозберігаючих заходів та потреби в реновації і покращенні санітарних умов будівлі;
- збір, аналіз, систематизацію та опис вихідної інформації про всі об'єкти;
- енергетичні розрахунки: визначено існуючу ситуацію (фактичну), величину економії енергії від здійснення заходів з енергоефективності та реновації.

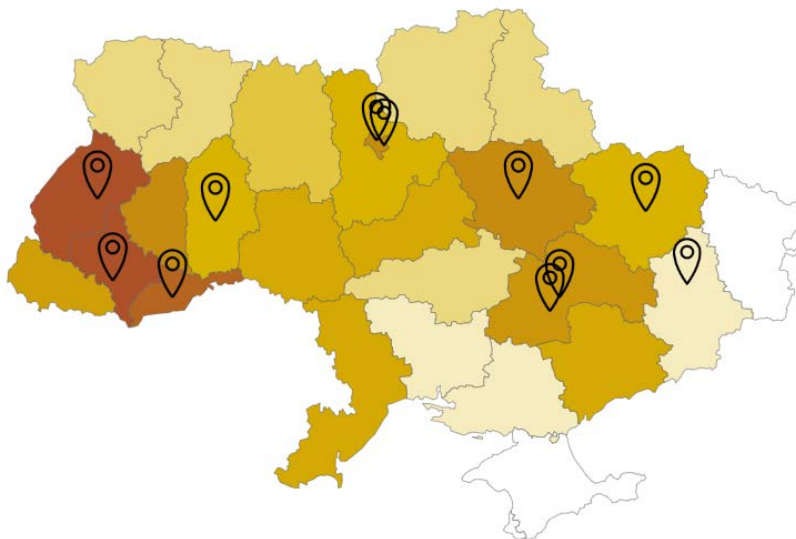


Рис. 1. Географічне розташування обстежених шелтерів на території України

Всі обстежені шелтери знаходяться в будівлях різного типу та років забудови. Деякі шелтери є квартирами, інші – окремими будівлями. Призначення будівель також відрізняється. Наприклад, під шелтер у м. Слов'янськ виділено будівлі госпіталю, а у с. Ружичанка Хмельницької області – будівлю мотелю. Деякі хостели переповнені мешканцями, в той час як інші можуть бути заповнені лише на третину. Тож обстежені об'єкти було кластеризовано ієрархічним методом за їх площею та кількістю мешканців (рис. 2). Всі обстежені шелтери є житловими, окрім одного у м. Київ, який був виділений в окремий кластер так як дане приміщення є нежитловим та слугує консультативним центром допомоги.

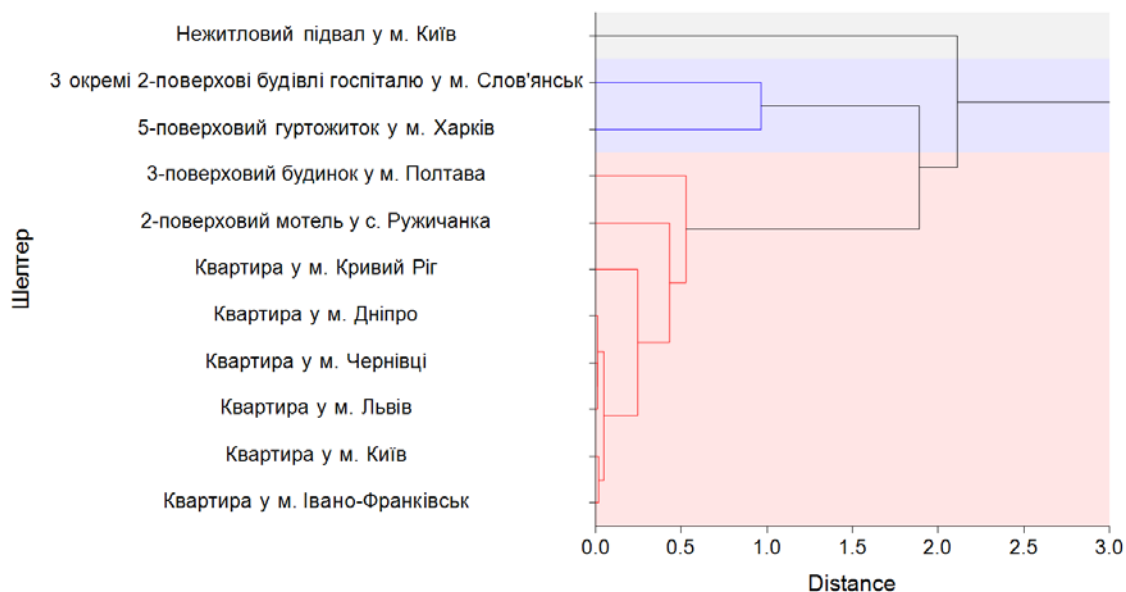


Рис. 2. Кластеризація обстежених шелтерів за площею та кількістю мешканців

Для узагальнення результатів енергетичного обстеження було створено табл. 1, в якій наочно представлено оцінку поточного стану огорожувальних конструкцій та інженерних систем одинадцяти шелтерів.

Таблиця 1

Оцінка стану огорожувальних конструкцій та інженерних систем шелтерів

	Шелтер (прихисток)	Зовнішні стіни	Світлопрозорі конструкції	Зовнішні двері	Система опалення	Гаряче водопостачання	Вентиляція	Опалення коли нема ел. ең.
1	Квартира у м. Івано-Франківськ (92 м ²)	Х	Х	✓	Х	Х	Х	Х
2	Квартира у м. Кривий Ріг (208 м ²)	Х	Х	✓	!	Х	✓	Х
3	Нежитловий підвал у м. Київ (107 м ²)	!	!	Х	✓	Х	✓	!
4	2-поверховий мотель у с. Ружичанка (1449 м ²)	✓	!	✓	!	✓	✓	✓
5	3-поверховий будинок у м. Полтава (677 м ²)	✓	✓	✓	!	✓	✓	!
6	5-поверховий гуртожиток у м. Харків (2926 м ²)	Х	Х	!	Х	✓	✓	Х
7	3 окремі 2-поверхові будівлі госпіталю у м. Слов'янськ (6065 м ²)	✓	Х	✓	✓	!	✓	✓
8	Квартира у м. Київ (55 м ²)	Х	✓	✓	!	!	Х	Х
9	Квартира у м. Львів (112 м ²)	!	!	✓	✓	✓	✓	Х
10	Квартира у м. Дніпро (79 м ²)	Х	Х	Х	Х	Х	✓	Х
11	Квартира у м. Чернівці (100 м ²)	✓	✓	Х	✓	✓	✓	Х

Оцінка стану:

✓ – добре (на разі не має потреби у покращенні);

! – задовільно (працює, але рекомендується підвищити енергоефективність);

Х – не задовільно (потребує реновації).

Оцінка стану огорожувальних конструкцій проводилась на основі даних про їх цілісність та розрахунковий опір теплопередачі. Оцінка інженерних систем базувалася на ефективності їх роботи в конкретному шелтері. Стан «добре» говорить про те що дана конструкція чи система є новою або модернізованою, задовольняє комфортним умовам та нормативним вимогам, які діяли в період модернізації, та не призводить до значних втрат енергії. Оцінка «задовільно» є допустимою, але демонструє не відповідність нормативним вимогам та потребу в підвищенні енергоефективності. Термінові потреби характеризуються оцінкою «не задовільно». Такий стан свідчить про безпосередній вплив даної конструкції чи системи на життєдіяльність мешканців та говорить про необхідність здійснення реновації в поточному році.

В результаті проведення енергетичного обстеження одинадцяти шелтерів запропоновано перелік заходів для забезпечення комфортних умов та зниження споживання енергоресурсів. Шелтери розміщені у будівлях різного призначення, характеристики огорожувальних конструкцій та інженерних систем яких дуже відрізняються між собою, а відповідно і енергетичні показники об'єктів.

Частота пропозицій застосування того чи іншого заходу для обстежених шелтерів представлена на рис. 3. Всі запропоновані заходи було поділено відповідно до інженерних систем, стосовно яких вони застосовуються. Варто зауважити, що метою проведеного енергетичного обстеження було виявлення пріоритетних заходів, впровадження яких дозволить значним чином вплинути в першу чергу на комфортні умов перебування людей там, та зрештою – на енергоефективність.



Рис. 3. Частота запропонованих заходів

Підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій стосується 52% від всіх запропонованих заходів. Опір теплопередачі майже всіх огорожувальних конструкцій обстежених шелтерів, визначений згідно [1], не відповідав діючим нормам [11]. Пріоритетним напрямком модернізації оболонки стала заміна вікон та ізоляція віконних відкосів, тому що неенергоефективні вікна (старі дерев'яні, металопластикові з однокамерним склопакетом) не лише впливають на тепловтрати теплопровідністю через конструкції, а й на втрати теплоти

інфільтрацією крізь нещільності цих конструкцій. Це так само стосується зовнішніх дверей. Тож з енергетичної та економічної точок зору модернізація/заміна вікон та дверей були внесені до списку пріоритетних заходів, на відміну від утеплення зовнішніх стін, 19% від всіх запропонованих заходів впливають на ефективність роботи систем опалення (СО). Пропозиції щодо модернізації СО включали заходи з використання додаткових обігрівачів в приміщеннях де неможливе переобладнання СО, а також встановлення буферних ємностей для СО окремої будівлі. Балансування пропонується застосувати в шелтерах (окремих будівлях), де було виявлено нерівномірність розподілення теплоносія. Заходи з заміни СО на одному з об'єктів включають заміну та утеплення труб рециркуляційних трубопроводів (шелтер в с. Ружичанка), на іншому – заміну наявних приладів опалення на біметалеві (шелтер у м. Полтава). Повна ж заміна системи опалення була запропонована лише в одному шелтері у м. Дніпро, де комфортні умови дотримуються найгірше.

У шелтері (квартирі), яка розміщена в будівлі 1934 року побудови в м. Дніпро середня температура в кімнатах взимку становить 14°C. На це впливають високі стелі, однотрубне розведення трубопроводів будівлі, розбалансована система опалення будинку та низький потенціал теплоносія, який надходить з центральної котельні. Тому запропоновано вирішити цю проблему шляхом переходу на індивідуальне газове опалення. Будинок, в якому знаходиться шелтер, підлягає від'єднанню від мережі централізованого опалення згідно з рішенням міської ради (№ 67/8 від 23.06.2021 та № 110/9 від 28.07.2021). У Дніпрі багатоквартирні будинки планово відмикають від центрального опалення після встановлення індивідуального опалення і тим, хто не має заборгованостей за теплопостачання, компенсують з міського бюджету кошти на встановлення індивідуального опалення. Таким чином реалізація даного заходу допоможе забезпечити комфортну температуру всередині, можливість регулювання та економію коштів, потребуючи для цього лише організації та контролю процесу переходу на індивідуальне опалення.

Через часті відключення електроенергії (блекаути), які відбувалися взимку 2022–2023 по всій території України, заходи в системі електропостачання переважно пов'язані з забезпеченням шелтерів альтернативними джерелами електроенергії. Для приміщень з індивідуальним газовим опаленням (шелтери у Полтаві, Чернівцях, Львові та Дніпрі (при переході на індивідуальне газове опалення) найкращим рішенням для тривалого забезпечення роботи котла є застосування джерел безперебійного живлення разом з акумуляторами. Така система допоможе запускати котел та підтримувати його роботу завжди під час планових відключень електроенергії, та певний час при аварійних відключеннях.

В шелтерах з високою концентрацією мешканців на квадратний метр (квартири у м. Києві та Івано-Франківську) природна вентиляція не забезпечує необхідного рівня повітрообміну в кімнатах, що позначається на комфортних умовах перебування людей всередині: підвищений рівень вологості впливає на здоров'я мешканців та стан конструкцій і меблів; подекуди присутній пліснявий грибок. Тож існує необхідність організації нормативного повітрообміну, який враховуватиме кількість людей. У зв'язку цим було запропоновано встановлення енергоефективних припливно-витяжних установок. Для того щоб зберегти тепло внутрішнього повітря припливно-витяжну установку доповнюють рекуператором, за допомогою якого тепло повітря, що видаляється передається припливному повітрю. Оптимальний режим вентиляції житлових кімнат, для забезпечення якості повітря та теплового комфорту всередині, було досліджено на прикладі квартири в роботі [12].

Окрім заходів, які безпосередньо впливають на енергоефективність та комфортність, ряд пропозицій стосувався опосередкованого впливу (10%). Наприклад, застосування мобільних осушувачів повітря дозволить зменшити надмірну вологість в кімнатах шелтеру в м. Івано-Франківськ. А монтаж натяжних стель в кімнатах висотою 3,4 м шелтеру у м. Дніпро

передбачає часткове перекриття відтоку теплоти разом з повітрям у верхню частину вентиляованого об'єму. Потреба у свердловині є базовою для шелтеру у м. Слов'янськотому, оскільки існуюча система центрального водопостачання не функціонує через військові дії в даному регіоні.

Висновки. Проведене дослідження дозволяє зорієнтуватися в тому, з якими проблемами стикаються шелтери в Україні з точки зору комфортних умов та енергоефективності. Звичайно, на базі обстежених об'єктів складно розробити загальні рекомендації, через те що під шелтери використовуються абсолютно різні приміщення. Але деякі аспекти варто виділити.

Індивідуальний підхід. Кожен шелтер має унікальні особливості, як конструктивні, так і експлуатаційні. Тому важливим є проведення аудиту та забезпечення регулярного моніторингу енергетичного стану кожного окремого прихистку.

Розосередження мешканців. Результати обстеження доводять високу концентрацію мешканців у малих шелтерах (квартирах) при невеликій кількості людей на площі шелтерів, які є окремими будівлями. Скупчення людей призводить до підвищення вологості, появи пліснявого грибка та необхідності впровадження припливно-витяжних вентиляційних систем.

Організаційні аспекти. Існують енергоефективні заходи, для впровадження яких не потрібні значні інвестиції, але необхідна інформаційна, організаційна та, в деяких випадках, юридична підтримка. В інших випадках це може бути впровадження енергоефективних звичок в побут шляхом донесення конкретних кроків та переваг енергоефективної поведінки до мешканців.

Ці аспекти вимагають спільних зусиль влади, громадських організацій та міжнародних донорів для забезпечення комфортних та енергетичних умов прихистків для внутрішньо переміщених та мало захищених верств населення в умовах сьогодення.

References

1. DSTU 9191:2022 Teploizoliatsiia budivel. Metod vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel [Thermal insulation of buildings. The method of choosing heat-insulating material for building insulation]. Valid from 2023-03-01. Kyiv: DP UkrNDNTs [in Ukrainian].
2. DSTU EN 15232-1:2017 Enerhoefektyvnist budivel. Chastyna 1. Vplyv avtomatyzovanykh system monitorynhu ta upravlinnia budivliamy [Energy Performance of Buildings. Part 1: Impact of Building Automation, Controls and Building Management]. Valid from 2017-08-01. Kyiv: DP UkrNDNTs [in Ukrainian].
3. Filipchuk, L., Lomonosova, N. (2022). Vymushena mihratsiia i viina v Ukraini [Forced migration and war in Ukraine]. URL: <https://cedos.org.ua/wp-content/uploads/vymushena-migracziya-ta-vijna-v-ukraïni.docx-1.pdf> [in Ukrainian].
4. Prykhystky ta sheltery Ukrainy [Shelters of Ukraine]. URL: <https://map.eleos.com.ua> [in Ukrainian].
5. Stukalo, O. (2023). Zamist chotyrok stin i dakhu – komfortnyi prostir: yak u seli na Ivano-Frankivshchyni oblashtuvaly prykhystok dlia vymusheno peremishchenykh zhinok i ditei [Instead of four walls and a roof, there is a comfortable space: how a shelter for forcibly displaced women and children was set up in a village in the Ivano-

Література

1. ДСТУ 9191:2022 Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Чинний від 2023-03-01. К.: ДП "УкрНДНЦ", 2023. 60 с.
2. ДСТУ EN 15232-1:2017 Енергоефективність будівель. Частина 1. Вплив автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями. Чинний від 2017-08-01. К.: ДП "УкрНДНЦ", 2017. 107 с.
3. Філіпчук Л., Ломоносова Н. Вимушена міграція і війна в Україні. 2022. URL: <https://cedos.org.ua/wp-content/uploads/vymushena-migracziya-ta-vijna-v-ukraïni.docx-1.pdf>.
4. Прихистки та шелтери України. URL: <https://map.eleos.com.ua>.
5. Стукало О. Замість чотирьох стін і даху – комфортний простір: як у селі на Івано-Франківщині облаштували прихисток для вимушено переміщених жінок і дітей. 2023. URL: <https://rubryka.com/article/shelter-dlya-vpo-kosivshhyna/>

Frankivsk region]. URL: <https://rubryka.com/article/shelter-dlya-vpo-kosivshhyna/> [in Ukrainian].

6. Zakhidnyi kurier (2023). Na Prykarpatti tryvaie realizatsiia mizhnarodnoho proiektu "Pidtrymka vidnovlennia Ukrainy", spriamovanoho na pokrashchennia umov zhyttia VPO [In the Carpathian region, the implementation of the international project "Support for the recovery of Ukraine" aimed at improving the living conditions of IDPs continues]. URL: <https://kuryer.if.ua/na-prykarpatti-tryvaye-realizacziya-mizhnarodnogo-proyektu-pidtrymka-vidnovlennya-ukrayiny-spryamovanogo-na-pokrashhennya-umov-zhyttya-vpo/> [in Ukrainian].

7. Alians hromadskoho zdorovia (2023). Alians vidkryv u tsentri Lvova shelter dlia VPO u formati khostelu [The Alliance opened a hostel-style shelter for IDPs in the center of Lviv]. URL: <https://aph.org.ua/uk/novyny/alyans-vidkryv-u-tsentri-lvova-shelter-dlya-vpo-u-formati-hostelu/> [in Ukrainian].

8. Behnke, N. L., Cronk, R., Shackelford, B. B., Cooper, B., Tu, R., Heller, L., Bartram, J. (2020). Environmental health conditions in protracted displacement: A systematic scoping review. *Science of The Total Environment*, 138234.

9. Shackelford, B. B., Cronk, R., Behnke, N., Cooper, B., Tu, R., D'Souza, M., ... Jaff, D. (2020). Environmental health in forced displacement: A systematic scoping review of the emergency phase. *Science of The Total Environment*, 714, 136553.

10. Adunola, A. O., Ajibola, K. (2016). Factors significant to thermal comfort within residential neighborhoods of Ibadan metropolis and preferences in adult residents' use of spaces. *SAGE Open*, 6, 2158244015624949.

11. ДБН В.2.6-31:2021 Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal insulation and energy efficiency of buildings]. Valid from 2022-09-01. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].

12. Deshko, V., Bilous, I., Sukhodub, I., Yatsenko, O. (2021). Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes. *Journal of Building Engineering*, 42 (2021), 103020.

6. На Прикарпатті триває реалізація міжнародного проекту "Підтримка відновлення України", спрямованого на покращення умов життя ВПО. 2023. URL: <https://kuryer.if.ua/na-prykarpatti-tryvaye-realizacziya-mizhnarodnogo-proyektu-pidtrymka-vidnovlennya-ukrayiny-spryamovanogo-na-pokrashhennya-umov-zhyttya-vpo/>

7. Альянс відкрив у центрі Львова шелтер для ВПО у форматі хостелу. 2023. URL: <https://aph.org.ua/uk/novyny/alyans-vidkryv-u-tsentri-lvova-shelter-dlya-vpo-u-formati-hostelu/>

8. Behnke N. L., Cronk R., Shackelford B. B., Cooper B., Tu R., Heller L., Bartram J. Environmental health conditions in protracted displacement: A systematic scoping review. *Science of The Total Environment*. 2020. 138234.

9. Shackelford B. B., Cronk R., Behnke N., Cooper B., Tu R., D'Souza M., ... Jaff D. Environmental health in forced displacement: A systematic scoping review of the emergency phase. *Science of The Total Environment*. 2020. 714. 136553.

10. Adunola A. O., Ajibola K. Factors significant to thermal comfort within residential neighborhoods of Ibadan metropolis and preferences in adult residents' use of spaces. *SAGE Open*. 2016. 6. 2158244015624949.

11. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 2022-09-01. К.: Мінрегіон України, 2022. 27 с.

12. Deshko V., Bilous I., Sukhodub I., Yatsenko O. Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes. *Journal of Building Engineering*. 2021. 42 (2021). 103020.

DESHKO VALERII

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>

Scopus Author ID: 6506189670

ResearcherID: J-6517-2017

E-mail: te@kpi.ua

YATSENKO OLENA

Doctor of Philosophy, Assistant lecturer,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8001-5987>

Scopus Author ID: 57226536764

ResearcherID: ACV-8484-2022

E-mail: loco-motion@ukr.net

SHEVCHENKO OLENA

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-9304-5432>

Scopus Author ID: 55839779200

ResearcherID: AAK-1436-2020

E-mail: alenashevchenko@ukr.net

BILOUS INNA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0002-6640-103x>

Scopus Author ID: 57194104035

ResearcherID: J-7070-2017

E-mail: bilous_inna@ukr.net

DESHKO V. I., YATSENKO O. I., SHEVCHENKO O. M., BILOUS I. Y.

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

**SHELTERS FOR INTERNALLY DISPLACED AND VULNERABLE PERSONS FROM
THE ENERGY EFFICIENCY AND COMFORT POINTS OF VIEW**

Purpose. Analysis of the actual state of shelters for internally displaced and vulnerable population groups, and investigation of ways to improve the comfort and energy efficiency of shelters.

Methodology. The initial survey of shelters located in different regions of Ukraine, to analyze their current state from the energy efficiency and comfort points of view, was carried out using observation and survey methods. Most shelters are part of buildings and not independent construction objects. The heat transfer resistances of enclosing structures according to DSTU 9191:2022 [1] and the energy efficiency of engineering systems according to DSTU EN 15232-1:2017 [2] were determined.

Findings. Based on the survey results, proposals were made to ensure and improve comfortable and energy efficient conditions in shelters. The work also highlights aspects that require joint efforts of the authorities, public organizations and international donors to improve living conditions in shelters.

Originality. Considering the lack of research on the state of shelters in Europe and actualization of these issues for Ukraine in the last two years, the analysis is both timely and relevant. It is known that the level of indoor thermal comfort has a great influence on the emotional and physical state of residents.

Practical value. The issues of providing comfortable and energy efficient microclimate in shelters are equally important, especially during the heating period and massive hostile attacks on Ukraine's energy infrastructure. Therefore, the conducted research has indicated the relevance of the energy efficiency problems of shelters in Ukraine.

Keywords: shelters; Internally Displaced Persons; IDP; thermal comfort; energy saving.

УДК 677.055

PLESHKO S. A., KOVALIOV Yu. A.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

DYNAMICS OF STRESS IN THE NEEDLE OF A KNITTING MACHINE WHEN INTERACTING WITH A WEDGE

Objective. The purpose of this study is to develop a method for assessing the influence of stiffness of the needle-wedge pair of a knitting machine on the dynamics of stress that occurs in the needle rod when it hits the wedge.

Methods. To resolve the tasks assigned for this study, modern methods of theoretical research based on the theory of propagation of stress waves in flat rod elements under longitudinal impact were used.

Results. Given the expediency of increasing the life time of knitting machine needles by reducing the stress that occurs during their interaction with wedges, this article is devoted to the development of a method for assessing the influence of stiffness of the needle-wedge pair of a knitting machine on the dynamics of stress that occurs in the needle rod when it hits the wedge. Thus, this paper presents a method of assessing the influence of stiffness of the needle-wedge pair of a knitting machine on the dynamics of stress arising in the needle rod during its shock interaction with the knitting system wedges. The analysis of obtained dependencies showed that the needle-wedge pair stiffness affects the intensity of stress in the needle rod caused by the shock wave. At the same time, the reduction in stiffness helps to reduce the intensity of stress in the needle rod. The needle has a complex geometric shape. Therefore, when a needle hits a wedge, a complex field of stresses, which depends on the geometric shape of the needle, arises in its body. Equations presented in this study approximately describe the process of changing the stresses in the body of the needle when it hits the wedge. However, the results obtained allow us concluding that reducing the stiffness of the needle-wedge pair has a beneficial effect on increasing the life time of knitting needles.

Originality. The development of scientific foundations and engineering methods of designing knitting machines.

Usefulness. An engineering method and algorithm for calculating the stresses in the needle of a knitting machine, which arises when it interacts with the knitting mechanism wedges, are proposed. It has been established that the life time of the needle can be increased by reducing the stiffness of the needle-wedge pair.

Keywords: knitting machine; needle; wedge; stress in the needle; stiffness of the needle-wedge pair.

Introduction. Operational efficacy of knitting machines, in particular the productivity and quality of the fabric, largely depends on the needles life time [1, 2], which, in turn, depends on the dynamic load that occurs in the zone of interaction between the needles and wedges of knitting systems.

According to the studies [3], an effective way to reduce the dynamic load on the needle during the knitting machine operation is to reduce the stiffness of the needle-wedge pair. However, the issue of influence of the needle-wedge pair stiffness on the dynamics of stress that arises in the needle rod has practically not been investigated, which, thus, creates certain problems for the knitting machines design.

Task assignment. The subject of this study is a knitting machine needle and the process of its interaction with the knitting machine wedges. To resolve the tasks assigned for this study, modern methods of theoretical research based on the theory of propagation of stress waves in flat rod elements under longitudinal impact were used.

Given the expediency of increasing the life time of knitting machine needles by reducing the stress that occurs during their interaction with wedges, this article is devoted to the development of a method for assessing the influence of stiffness of the needle-wedge pair of a knitting machine on the dynamics of stress that occurs in the needle rod when it hits the wedge.

Study results. Studies [4–10] etc., showed that when a knitting needle hits a wedge, shock waves of stress occur in its rod, which is one of the main causes of needles failure (needle hook

destruction, etc.). At the same time, to determine the intensity of stress occurring in the needle rod, the case of hard hit of the needle (rod) on the wedge is considered. In fact, when the needle hits the wedge, there is an elastic impact caused by the stiffness of the needle-wedge pair.

When studying the issue of propagation of stress waves that occur at the moment of hit, consider the rod, the diagram of which is presented in Fig. 1, a. The axis of the rod is taken as the X axis. The hit force is added to the O point of the rod.

Initial data: for $t = 0$ $u = 0$; $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$; boundary data (for $x = 0$):

$$EF \frac{\partial u}{\partial x} = -N(t), \quad (1)$$

where $u = u(x, t)$ is hit-impacted longitudinal movement of the cross section of the rod;

E is a modulus of normal elasticity of the rod material;

F is cross-sectional area of the rod;

$\frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon$ is relative elongation of the rod;

$N(t)$ is hit-caused compression force of the rod.

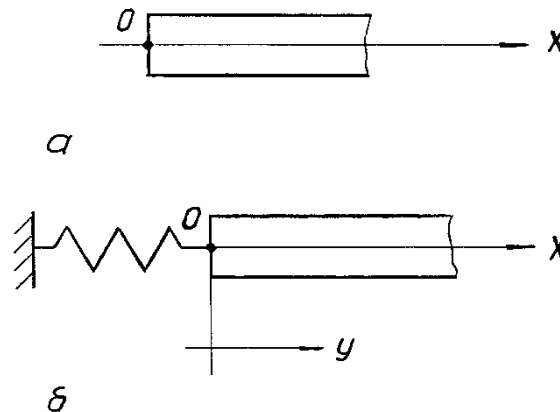


Fig. 1. Calculation model for the analysis of the propagation process of an elastic longitudinal wave of stress in the knitting machine needle rod:

a – when the needle hits the wedge hard; б – with an elastic impact

Evidently: $N(t) \equiv 0$ for $t \leq 0$.

The movement of the rod cross-sections, when hit, is described by a differential equation:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2)$$

where $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ is the rod material sound speed;

ρ is the rod material mass linear density.

Suppose that a longitudinal wave propagates along the rod:

$$u = f(x - at), \quad (3)$$

which obeys Eq. (2).

Then, the rod cross-sections movement equation can be represented as:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = f'(x - at). \quad (4)$$

Thus, solving Eq. (4) using the boundary conditions, we obtain:

$$EFf'(-at) = -N(t). \quad (5)$$

From which:

$$f'(-at) = -\frac{N(t)}{EF}. \quad (5)$$

Eq. (5) shall be presented as:

$$-\frac{1}{a} \cdot \frac{d}{dt} f(-at) = -\frac{N(t)}{EF}.$$

Or as:

$$\frac{d}{dt} f(-at) = \frac{aN(t)}{EF}. \quad (6)$$

Eq. (6) can be solved by using the method of variation of an arbitrary constant by integrating:

$$f(-at) = \int_0^t \frac{aN(\tau)}{EF} d\tau = \frac{a}{EF} \int_0^t N(\tau) d\tau. \quad (7)$$

From which, we obtain:

$$f(x - at) = \frac{a}{EF} \int_0^{t - \frac{x}{a} \geq 0} N(\tau) d\tau = u(x, t). \quad (8)$$

Using obtained dependence (7), it is possible to find the longitudinal movement of the rod cross-sections, when hit.

Let us now consider the case of a rod hit, given elastic properties (elastic impact) – fig. 1, б. When the rod hits, the longitudinal movement of its sections is determined so long as:

$W = u(x, t) + v_0 t$, or, given (7):

$$W = \frac{a}{EF} \int_0^{t - \frac{x}{a} \geq 0} N(\tau) d\tau + v_0 t, \quad (8)$$

where W is hit-impacted longitudinal movement of the cross section of the rod (elastic impact);

v_0 is the rod initial speed (hit speed).

The rod hit-caused stiffness force is found by the Eq.:

$$N(t) = cy(t), \quad (9)$$

where c is the rod stiffness in the hit are.

By substituting (9) into (8), we obtain:

$$W = \frac{ac}{EF} \int_0^{t-\frac{x}{a} \geq 0} y(\tau) d\tau + v_0 t. \quad (10)$$

Eq. (10) is presented as:

$$\frac{ac}{EF} \int_0^t y(\tau) d\tau + v_0 t = y(t). \quad (11)$$

By solving Eq. (11), we obtain:

$$\frac{ac}{EF} y(t) + v_0 = \frac{d}{dt} y(t),$$

or:

$$y'(t) - \frac{ac}{EF} y(t) = v_0. \quad (12)$$

By solving Eq. (12), we obtain:

$$y(t) = -\frac{EF}{ac} v_0 + A e^{\frac{ac}{EF} t}. \quad (13)$$

The A integration constant is found using initial conditions: for $t = 0$ $y(t = 0)$:

$$A = \frac{EF}{ac} v_0. \quad (14)$$

By substituting (14) into (13), we obtain:

$$y(t) = \frac{EF}{ac} v_0 \left(1 - e^{-\frac{ac}{EF} t} \right). \quad (15)$$

The rod stiffness force is found by substituting (15) into (9):

$$N(t) = \frac{EF}{a} v_0 \left(-1 + e^{\frac{ac}{EF} t} \right). \quad (16)$$

The stresses in the rod cross-sections, when hit, will make:

$$\sigma(t) = \frac{N(t)}{F} = \frac{E}{a} v_0 \left(-1 + e^{\frac{ac}{EF} t} \right). \quad (17)$$

Representing the needle in the form of a rod of piecewise variable cross-section [5], the value of the maximum stresses $\sigma_{i \max}$ in the cross-sections of individual sections l_i of the rod is found by the

following Eq. (given that $\sigma(t)_i = \sigma_{i \max}$ for $t = \frac{2l_i}{a}$):

$$\sigma_{i\max} = \frac{Ev_0}{a} \left(-1 + e^{\frac{2cl_i}{EF_i}} \right). \quad (18)$$

Findings. The analysis of obtained dependencies (17), (18) shows that the stiffness of the needle-wedge pair affects the magnitude of stress in the needle rod caused by the shock wave. At the same time, the decrease in stiffness contributes to the decrease in the intensity of stress in the needle rod.

As it is known, the needle has a complex geometric shape. Therefore, when a needle hits a wedge, a complex field of stresses, which depends on the geometric shape of the needle, arises in its body. Thus, obtained equations (17), (18) approximately describe the process of stress change in the body of the needle when it hits the wedge. However, the results obtained allow us concluding that reducing the stiffness of the needle-wedge pair has a beneficial effect on increasing the life time of knitting needles.

References

Література

1. Voloschenko, V. P., Pipa, B. F., Shypukov, S. T. (1977). Ekspluatatsiina nadiinist mashyn trykotazhnoho vyrobnytstva [Operational reliability of knitting machines]. Kyiv: Tekhnika. 136 p. [in Ukrainian].
2. Pipa, B. F., Voloschenko, V. P., Shypukov, S. T., Orlov, V. A. (1983). Pidvyschennia nadiinosti trykotazhnoho obladnannia [Increasing the reliability of knitted equipment]. Kyiv: Tekhnika. 12 p. [in Ukrainian].
3. Khomiak, O. M., Pipa, B. F. (1990). Pidvyschennia efektyvnosti roboty v'iazalnykh mashyn [Increasing the efficiency of knitting machines]. Kyiv: Tekhnika. 209 p. [in Ukrainian].
4. Petrov, E. I. (1959). Pro umovy roboty v'iazalnykh holok [About working conditions of knitting needles]. *Tekstylna promyslovist = Textile industry*, № 3, P. 25–28 [in Ukrainian].
5. Petrov, Yu. I., Petrov, E. I. (1959). Khvyli napruhy v stryzhnevyykh detaliakh mashyn pry pozdovzhnomu udari [Stress waves in rod parts of machines during longitudinal impact]. *Visti vuziv: Mashynobuduvannia = News of universities: Mechanical engineering*, № 5, P. 11–24 [in Ukrainian].
6. Pleshko, S. A., Kovalov, Yu. A., Rubanka, M. M. (2022). Pidvyschennia efektyvnosti roboty v'iazalnykh mashyn: monohrafiia [Improving the efficiency of knitting machines: a monograph]. Kyiv: KNUTD. 288 p. [in Ukrainian].
7. Krassii, H. H. et al. (1975). Dovidnyk trykotazhnyka [The Knitter's Handbook]. Kyiv: Tekhnika. 320 p. [in Ukrainian].
8. Moiseienko, F. A. (1994). Proektuvannia v'iazalnykh mashyn [Designing knitting machines]. Kharkiv: Osnova. 336 p. [in Ukrainian].
9. Zatapi, S. (1998). Pidvyschennia efektyvnosti roboty mekhanizmu v'iazannia odnofonturnoi kruhloviazalnoi mashyny [Improving the efficiency of the knitting
1. Волощенко В. П., Піпа Б. Ф., Шипуков С. Т. Експлуатаційна надійність машин трикотажного виробництва. Київ: Техніка, 1977. 136 с.
2. Піпа Б. Ф., Волощенко В. П., Шипуков С. Т., Орлов В. А. Підвищення надійності трикотажного обладнання. Київ: Техніка, 1983. 12 с.
3. Хомяк О. М., Піпа Б. Ф. Підвищення ефективності роботи в'язальних машин. Київ: Техніка, 1990. 209 с.
4. Петров Е. І. Про умови роботи в'язальних голок. *Текстильна промисловість*. 1959. № 3. С. 25–28.
5. Петров Ю. І., Петров Е. І. Хвилі напружень в стрижневих деталях машин при поздовжньому ударі. *Вісті вузів: Машинобудування*. 1959. № 5. С. 11–24.
6. Плешко С. А., Ковальов Ю. А., Рубанка М. М. Підвищення ефективності роботи в'язальних машин: монографія. Київ: КНУТД. 2022. 288 с.
7. Крассий Г. Г. та ін. Довідник трикотажника. Київ: Техніка, 1975. 320 с.
8. Мойсєєнко Ф. А. Проектування в'язальних машин. Харків: Основа, 1994. 336 с.
9. Затарі С. Підвищення ефективності роботи механізму в'язання однофонтурної

mechanism of a single-font circular knitting machine: abstract of the dissertation of a candidate of technical sciences: 05.19.09]. Kyiv. 17 p. [in Ukrainian].

10. Zenkin, N. A. (1995). Pidvyschennia dovhovichnosti detalei mekhanizmu v'язання kruhloviazalnykh mashyn [Increasing the durability of parts of the knitting mechanism of circular knitting machines: abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: 05.19.09]. Kyiv. 17 p. [in Ukrainian].

круглов'язальної машини: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.19.09. Київ, 1998. 17 с.

10. Зенкін Н. А. Підвищення довговічності деталей механізму в'язання круглов'язальних машин: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.19.09. Київ, 1995. 17 с.

PLESHKO SERGEY

Candidate of Sciences in Engineering (PhD),
Associate Professor, Department of Mechanical
Engineering, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4348-2858>
Scopus Author ID: 57221107365
Researcher ID: AAP-5539-2021
E-mail: pleshko.sa@knutd.com.ua

KOVALOV YURI

Candidate of Sciences in Engineering (PhD),
Associate Professor, Department of Mechanical
Engineering, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2321-6763>
Scopus Author ID:
Researcher ID: AAP-5469-2021
E-mail: kovalov.ya@knutd.edu.ua

ПЛЕШКО С. А., КОВАЛЬОВ Ю. А.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
**ДИНАМІКА НАПРУЖЕНЬ В ГОЛЦІ В'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ
ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З КЛИНОМ**

Мета. Метою дослідження є розробка методу оцінки впливу жорсткості пари голка-клин в'язальної машини на динаміку напружень, що виникають у стержні голки при ударі о клин.

Методика. При вирішенні завдань, поставлених у цій роботі, були використані сучасні методи теоретичних досліджень, що базуються на теорії поширення хвиль напружень у плоских стержневих елементах при подовжньому ударі.

Результати. Враховуючи доцільність підвищення довговічності роботи голок в'язальних машин шляхом зниження напружень, що виникають при їх ударній взаємодії з клинами, стаття присвячена розробці методу оцінки впливу жорсткості пари голка-клин в'язальної машини на динаміку напружень, що виникають у стержні голки при ударі о клин. Представлений метод оцінки впливу жорсткості пари голка-клин в'язальної машини на динаміку напружень, що виникають у стрижні голки під час ударної взаємодії її з клинами в'язальних систем. Аналіз отриманих залежностей, показав, що жорсткість пари голка-клин впливає на величину напружень в стрижні голки, викликаних ударною хвилею. При цьому зниження жорсткості сприяє зниженню величини напружень у стержні голки. Голка має складну геометричну форму. Тому при ударі голки об клин у її тілі виникає складне поле напружень, яке залежить від геометричної форми голки. Отримані рівняння дають лише деяке наближення опису процесу зміни напружень в тілі голки при ударі її об клин. Однак отримані результати дозволяють дійти висновку, що зниження жорсткості пари голка-клин сприятливо впливає на підвищення довговічності в'язальних голок.

Наукова новизна. Розвиток наукових основ та інженерних методів проектування в'язальних машин.

Практична значимість. Запропоновано інженерний метод та алгоритм розрахунку напружень в голці в'язальної машини, що виникають при взаємодії її з клинами механізму в'язання. Встановлено, що підвищення довговічності голки можна досягти шляхом зниження жорсткості пари голка-клин.

Ключові слова: в'язальна машина; голка; клин; напруга в голці; жорсткість пари голка-клин.

УДК621.317

¹ SMOLIANINOV V. G., ² SUKHOPARA O. M.

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

² Research and Production Enterprise "MTI", Kyiv, Ukraine

DETERMINATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF A LINEAR STEPPER DEVICE

Purpose. Consideration of the design and determination of the electromagnetic parameters of a linear stepper device during step-by-step movement of the moving link, obtaining formulas in analytical form for their calculation and improving the operating efficiency of the linear stepper device.

Methodology. When conducting research on a linear stepper device with the step-by-step movement of a moving link, the theory of electrical and magnetic circuits was used, and calculation of electromagnetic parameters was carried out taking into account the design parameters of the switched-on stator section of a linear stepper device that changes when the moving link moves by the step size.

Findings. The design features of n -winding linear stepper devices are considered and the operation of the three-section structure of a linear stepper device is analyzed. An analysis of changes in the electromagnetic parameters of the magnetic circuit in the section of the switched-on stator winding of a linear stepper device has been carried out, and the dependence of the magnetic resistance in individual sections of the magnetic circuit on the design parameters has been found, and the position of the moving link of the linear stepper device. The correspondence between the change in inductive parameters when moving the moving link and the change in electrical characteristics in the section of the switched-on stator winding of a linear stepper device has been established.

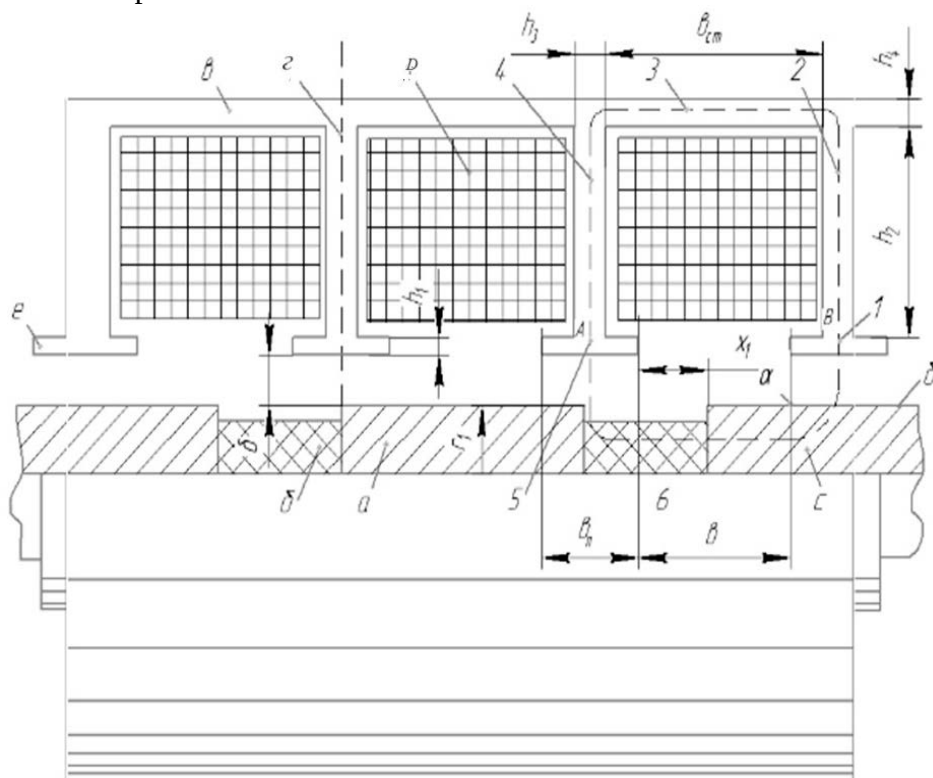
Originality. The intervals of change in magnetic resistance when moving the moving link of a linear stepper device by a step value are determined and analytical expressions for their calculation are obtained. The change in inductive parameters when moving the moving link of a linear stepper device by a step size has been studied, and analytical expressions have been found for calculating the inductance and its derivative for the convenience of calculations, presented in dimensionless form.

Practical value. The results obtained can be used in the development of new designs of linear stepper devices, and monitoring changes in electromagnetic parameters and electrical characteristics in the switched-on winding section of linear stepper devices increases the efficiency of their operation.

Keywords: electromagnetic parameters; magnetic resistance; linear stepper device; moving link; step-by-step movements.

Introduction. The widespread use of linear electromagnetic drives in various fields of industry is due to several advantages: the elimination of intermediate mechanical and other gears from the drive system to convert rotational motion into linear motion; environmentally friendly and quiet operation; simplicity and reliability of design; manufacturability and wide functionality combined with a simple control system. There are a large number of mechanisms that use a change in the magnetic field in them to create a torque or synchronizing force [1–11]. Changes in the magnetic field and electromagnetic processes during the operation of electrical machines [1, 2], for electric machines with transverse magnetic flux [3–6], a change in characteristics is achieved through design changes: the cross-section of the coils, the air gap, the distance between the poles. When moving a moving link step by step, both rotationally [7–9] and linearly [10, 11], stepper devices are used. However, the issue of the operation of these devices during linear step-by-step movement of the movable link of the executive body has not been sufficiently considered. Particularly in need of additional research is the change in electromagnetic parameters, which is based on a discrete change in the state of the electromagnetic field in the working gap due to pulse excitation when moving the moving link by a step size, which is a relevant scientific and technical task.

Statement of the task. When designing automated systems that include electromagnetic linear stepper devices (LSD) with step-by-step movement of the moving link (ML) to ensure



ferromagnetic elements separated by non-magnetic inserts – δ . Stator sections – B with magnetic poles – $\mathcal{Z}$, between which are located field windings – D and pole pieces – e , turned towards the moving element. Design parameters that make up the structure of the stator section: h_1 – thickness of the pole piece; h_2 – pole length; $h_3 = h_4$ – thickness of pole and rim stator sections; b_n – width of the pole piece; b – the distance between poles (pole pieces); b_{cr} – the distance between the poles of the stator section; r_1 – radius of the moving link; σ – technological gap between the stator section and the moving link; x_1 – the gap between the ferromagnetic element of the moving link and the pole piece; x – step of movement, which changes during the movement of the moving link when development of which, ferromagnetic element occupies a magnetic equilibrium position under the pole pieces, for example, in the middle section in Fig. 1.

The dependence of inductance on the magnetic resistance of the load circuit is known [12], and has the form:

$$L = W^2 / R_m, \quad (1)$$

where is $R_m = \sum_{k=1}^n R_{mk} = l_1 / \mu_1 S_1 + \dots + l_n / \mu_n S_n$ – magnetic resistance of segments of the magnetic circuit of the stator section of the switched-on winding of the LSD;

μ_n – magnetic permeability of the medium;

S_n – cross-sectional area of the magnetic flux;

l_n – average length of the magnetic field line of each segment of the magnetic circuit;

W is the number of turns of the excitation winding of the magnetic circuit.

The magnetic flux is closed through all segments of the magnetic circuit (Fig. 1, segments 1–6), to find the total magnetic resistance, we determine the magnetic resistance at each segment [13]. As can be seen from the given structure of the LSD, the geometric dimensions of the stator section are fixed, then we get five segments of the magnetic circuit: $R_{m1} = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m4} + R_{m5}$ – the values of which do not change when the ML of the LSD is moved. For these segments, we determine the average length of the magnetic field line and the cross-sectional area through the geometric dimensions of the stator section: $l_1 = l_5 = h_1$; $S_1 = S_5 = 2\pi b_n(\sigma + r_1)$; $l_2 = l_4 = h_2$; $S_2 = S_4 = 2\pi h_3(\sigma + r_1 + h_1)$; $l_3 = b_{\text{cr}} + h_3$; $S_3 = \pi h_4^2$; μ_1 – is the magnetic permeability of the medium in five areas, then the total magnetic flux in areas where the geometric dimensions do not change when moving the moving link, has the form

$$R_{m1} = \sum_{k=1}^5 R_{mk} = \frac{1}{\mu_1 \pi} \cdot \left[\frac{h_1}{b_n(\sigma + r_1)} + \frac{h_2}{h_3(\sigma + r_1 + h_1)} + \frac{b_{\text{cr}} + h_3}{h_4^2} \right]. \quad (2)$$

To calculate the magnetic resistance in the sixth segment of Fig. 1, the geometric parameters of which change when moving the ML of the LSD, let us represent magnetic field lines as circular arcs [12, 14]. Circular arcs create elementary tubes of magnetic conductivity, which makes it possible to approximately write them in analytical form. The edge conductivities between the corresponding faces of the stator section are found by integrating elementary tubes that determine the relative position of the faces of the poles, pole pieces and the ferromagnetic element in the direction of movement of the moving link of the LSD. We will determine the edge conductivities for three ranges of changes in the position of the moving link of the LSD: the first range – before the start of movement; second range – movement by step size; the third range is the position of magnetic equilibrium in the section of the switched-on stator winding of the LSD.

Let's consider the operation of the LSD using the example of the switched-on right section in Fig. 1, where the ferromagnetic element of the ML moves to the left until the magnetic equilibrium position is reached under the pole pieces of poles A and B. We write the total magnetic resistance in the sixth segment as,

$$R_{m2} = 1/G_1 + 1/G_2, \quad (3)$$

where is G_1 –the conductivity of the first pole of the stator section of the LSD;
 G_2 – conductivity of the second pole of the stator section of the LSD.

For the first range of changes in the position of the ML within $0 \leq X_1 \leq b/2$ the right section in Fig. 1, magnetic resistance through the conductivity of the faces of the first (A), second (B) poles and faces (C) of the ferromagnetic element of the moving link

$$R_{m21} = \frac{1}{G(B_1C_1) + G(B_2C_2) + G(B_3C_3) + G_\alpha + G_6} + \frac{1}{G(A_1C_1) + G(A_2C_2) + G(A_2C_1)}, \quad (4)$$

where A_1, B_1, C_1 are the faces of the pole pieces of poles A and B turned towards the moving link of the LSD and the left end surface C of the ferromagnetic element of the moving link in Fig. 1;

A_2, B_2, C_2 – the internal faces of the poles A and B and the surface C of the ferromagnetic element of the moving link facing the pole pieces A and B;

A_3, B_3, C_3 – the outer edges of the poles A and B and the right end surface C of the ferromagnetic element of the moving link;

$G(B_1C_1), G(B_2C_2), G(B_3C_3), G(A_1C_1), G(A_2C_2), G(A_2C_1)$ – conductivity between the corresponding faces;

G_α, G_6 – conductivity on the surface of the ferromagnetic element of the moving link under the pole piece B, the field lines of which are concentric circles centered at these points.

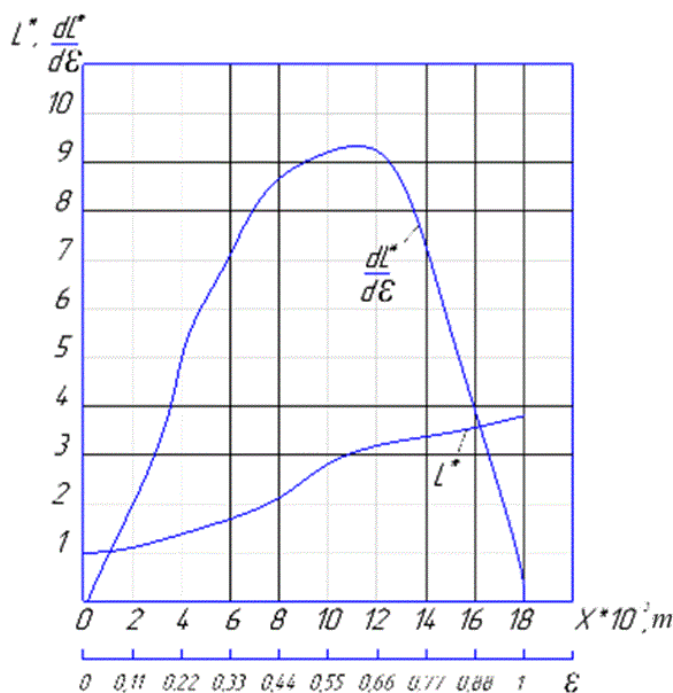


Fig. 2. Graphics of inductance and its derivative in dimensionless form

Then the total magnetic resistance for the first range, taking into account expressions (2) and (4): $R_{mI} = R_{m1} + R_{m21}$, and the inductance $L_I = W^2/R_{mI} = W^2/(R_{m1} + R_{m21})$ has a minimum value on the graph – L^* , Fig. 2, before the moving link of the LSD begins to move. To determine the relationship between electromagnetic parameters, consider the value of inductance L_I and its relationship with the change in electrical parameters in the winding of the switched-on section of the

LSD. As can be seen from changes in the current value in the switched-on windings of the LSD [7, 15, 16], with minimal inductance, the current increases in the winding of the switched-on stator section in the absence of movement of the moving link.

The second range, when $X_1 < b/2$ characterizes the movement of the moving link by a step size in the direction of the pole piece A of the switched-on right section of the LSD, where the inductance of the magnetic circuit increases, and the current in the switched-on excitation winding decreases [7, 15, 16]. Then the magnetic resistance has the form:

$$R_{m22} = \frac{1}{G(A_1C_1) + G(A_1C_2) + G(A_2C_2) + 2G_\alpha} + \frac{1}{G(B_2C_2) + G(B_1C_2) + G(B_1C_3) + G(B_3C_3) + 2G_\alpha}. \quad (5)$$

The total magnetic resistance in the second range, taking into account expressions (2) and (5), is defined as $R_{mII} = R_{m1} + R_{m22}$, and the inductance (1) has the form $L_{II} = W^2/R_{mII} = W^2/(R_{m1} + R_{m22})$ and continues to increase on the graph – L^* , Fig. 2.

In the third range, when $X = X_{max}$ the ferromagnetic element of the moving link of the LSD took a step of movement and reached the position of magnetic equilibrium in the section of the switched-on excitation winding. The current in the switched-on winding begins to increase [7, 15, 16], and the inductance reaches its maximum value on the graph – L^* , Fig. 2. Magnetic resistance at a given position of the moving link

$$R_{m23} = \frac{1}{G(A_1C_1) + G(A_1C_2) + G(A_2C_2) + G(A_1C_3) + 2G_\alpha} + \frac{1}{G(B_2C_2) + G(B_1C_2) + G(B_1C_3) + 2G_\alpha}. \quad (6)$$

The total magnetic resistance in the third range, taking into account expressions (2) and (6), is defined as $R_{mIII} = R_{m1} + R_{m23}$, and the inductance (1) has the form $L_{III} = W^2/R_{mIII} = W^2/(R_{m1} + R_{m23})$.

Conductivity (A_1C_1) is due to the interaction between the corresponding faces and for $x_1 > \sigma$, has the form:

$$G(A_1C_1) = \int_{x_1}^{r_1 + \sigma} (\mu_0 l dr) / (r \pi / 2) = (2\mu_0 l / \pi) \ln((r_1 + \sigma) / x_1), \quad (7)$$

where r_1 is the current radius of the circular arc of the elementary tubes that come from the end of the ferromagnetic element C_1 of the moving link on the edge of the pole piece A_1 pole A;

l – effective length in the direction normal to the power lines;

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m – magnetic constant.

The effective length can be taken equal to the circumference of a circle with radius $r_1 + \sigma$, minus the radius of the average field line found as the geometric mean between x_1 and $(r_1 + \sigma)$, then $l = 2\pi [r_1 + \sigma - \sqrt{x_1(r_1 + \sigma)}]$. Thus, the conductivity (7) between the faces has the form: $G(A_1C_1) = 4\mu_0 [r_1 + \sigma - \sqrt{x_1(r_1 + \sigma)}] \ln((r_1 + \sigma) / x_1)$.

After appropriate transformations, it is possible to calculate the conductivities between other faces of the ferromagnetic element of the moving link, the poles and pole pieces at the step of moving the ML of the LSD.

Let us imagine the electrical equivalent circuit of the switched-on winding of the stator section of the LSD in the form of a series connection of inductance and active resistance of the winding [12]. Then the equation of the electrical circuit has the form:

$$iR_H + L \cdot di/dt + i \cdot dL/dt = U_n \text{ or } di/dt + i dL/dx/Ldxdt + i R_H/L = U_n/L, \quad (8)$$

where is U_n – the rated voltage of the power supply;

R_H – active resistance of the excitation winding;

i – field winding current;

L – inductance;

dL – derivative of the inductance of the magnetic circuit of the switched-on section of the LSD.

Taking into account the equation of an electrical circuit (8), the change in the parameters of the magnetic circuit, expression (2 – 6) and the analysis of experimental data on the change in inductance depending on the position of the ML of the LSD [1, 13], at a step of movement in the range $\xi < x \leq (b_{ct} + h_3 - b_n)/2$, the inductance and its derivative can be represented in the form (9) and (10):

$$L = L_{III} - \Delta L_I \cos\left(\frac{\pi(x - \xi)}{b_{ct} + h_3 + b_n - 2\xi}\right), \quad (9)$$

$$\frac{dL}{dx} = \frac{\pi}{2(b_{ct} + h_3 - b_n - 2\sigma)} \Delta L_I \sin\left(\frac{\pi(x - \xi)}{b_{ct} + h_3 - b_n - 2\xi}\right), \quad (10)$$

and for the range $(b_{ct} + h_3 - b_n)/2 \leq x < (b_{ct} + h_3)/2$, in the form (11) and (12)

$$L = L_I + \Delta L_{II} \sin\left(\frac{\pi(2x + b_n - b_{ct} - h_3)}{2b_n}\right), \quad (11)$$

$$\frac{dL}{dx} = \frac{\pi}{2b_n} \Delta L_{II} \cos\left(\frac{\pi(2x + b_n - b_{ct} - h_3)}{2b_n}\right), \quad (12)$$

where x is the displacement of the moving link along the switched-on stator section;

ξ – displacement of the ferromagnetic element of the moving link from the position of magnetic equilibrium in the section of the switched-on winding;

ΔL_I – the increase in inductance in the section from L_{min} to L_{II} when the ferromagnetic element of the moving link fits the pole piece of the switched section;

ΔL_{II} – increase in inductance from position $x = \frac{b_n}{2}$ to position of magnetic equilibrium of the switched-on section;

$L_I = L_{min}$ – minimum inductance before the moving link of the LSD begins to move;

$L_{III} = L_{max}$ – maximum inductance in the magnetic equilibrium position for the switched-on LSD section.

To maintain equality of changes in inductance (9) and (11) between displacement sections, we use approximating functions: $\Delta L_I/\Delta L_{II} = (b_{ct} + h_3 - b_n - 2\xi)/b_n$; $\Delta L_I = (L_{II} - L_I) ((b_{ct} + h_3 - b_n - 2\xi)/(b_n - 2\xi))$; $\Delta L_{II} = (L_{II} - L_I) b_n/(b_n - 2\xi)$.

To reduce the volume of calculations, we reduce expressions (9–12) to dimensionless form. Coefficients that determine the relationship between dimensional and dimensionless quantities:

$$L^* = L/L_I; \Delta L_I^* = \Delta L_I/L_I; \Delta L_{II}^* = \Delta L_{II}/L_I; \varepsilon = x/x_\sigma; \xi^* = \xi/x_\sigma; K = b_n/2x_\sigma, \quad (13)$$

where $x_\sigma = \frac{b_{ct} + h_3}{2}$ is the movement step,

$L_\sigma = L_{min} = L_I$ – minimum inductance before the moving link begins to move.

After appropriate transformations, taking into account the coefficients (13), at the step of displacement in the range $\xi^* < \varepsilon \leq 1 - K$, inductance and its derivative can be represented in the form

$$L^* = L_{II}^* - \Delta L_I^* \cos \left[\frac{\pi(\varepsilon - \xi^*)}{2(1 - K - \xi^*)} \right]; \frac{dL^*}{d\varepsilon} = \frac{\pi}{2(1 - K - \xi^*)} \Delta L_I^* \sin \left[\frac{\pi(\varepsilon - \xi^*)}{2(1 - K - \xi^*)} \right], \quad (14)$$

and in the range $1 - K < \varepsilon \leq 1$, in the form

$$L^* = L_I^* + \Delta L_{II}^* \sin \left[\frac{\pi(\varepsilon + K - 1)}{2K} \right]; \frac{dL^*}{d\varepsilon} = \frac{\pi}{2K} \Delta L_{II}^* \cos \left[\frac{\pi(\varepsilon + K - 1)}{2K} \right]. \quad (15)$$

Using the given expressions (14, 15), dependencies were constructed for inductance, graph – L^* and its derivative, graph – $dL^*/d\varepsilon$, presented in Fig. 2.

When analyzing the dependence of inductance and its derivative on the coordinate at the movement step in Fig. 2, before the start of movement, the inductance is equal to L_I – is minimal, and its derivative has zero value. After the start of movement, the inductance L_{II} – increases, and the derivative is significantly increases. When the moving link approaches pole piece, the inductance does not change significantly, which leads to a rapid change in its derivative, which in the magnetic equilibrium position takes on a zero value. The magnetic circuit closes through areas with low magnetic resistance and the inductance L_{III} – reaches its maximum value. In accordance with the change in the inductive parameters of the LSD in Fig. 2, a change in the electrical characteristics occurs, the current value in the winding of the switched-on LSD.

From the analysis of the time intervals of moving the moving link by the step size and changing the current in the winding of the LSD [15], an increase in the current after passing its minimum value corresponds to a decrease in the derivative of the inductance to zero in Fig. 2, switching the LSD windings at this point in time makes it possible to increase the dynamic characteristics of the LSD by 1/3 relative to traditional switching upon achieving a steady current value in the LSD winding, and when switching at the maximum value of the inductance derivative in Fig. 2, which corresponds to the minimum value of the current in the winding of the LSD after the end of the movement of the moving link by the step value, it is possible to increase the dynamic characteristics of the LSD by 1/2, while the energy indicators of the consumed energy of the LSD are correspondingly improved, which is no longer spent on heat losses and heating of the LSD, after completing the move step.

Taking into account the above, when developing LSD control systems that monitor changes in electromagnetic parameters and electrical characteristics, for example, the currents values in the windings of the LSD, it is possible to implement control without additional sensors to control the movement of the moving link and increase the efficiency of the LSD operation.

Conclusions. The design of a three-section linear stepping device is considered and a study of its operation at the step of moving the moving link is carried out. An analysis of changes in the electromagnetic parameters of the LSD was carried out and analytical expressions were obtained for calculating magnetic resistance, inductance and its derivative depending on the design parameters of the LSD, when moving the moving link by a step size, for the convenience of calculations presented in dimensionless form. A analysis of changes in the inductive parameters of the internal structure of the LSD and electrical characteristics, for example, changes in the current value in the winding of the switched-on stator section of the LSD; their relationship was established, which makes it possible to organize the effective functioning of the LSD by monitoring electromagnetic processes and electrical characteristics in the LSD's own design without the use of additional complex hardware funds.

At the same time, changes in the air gap between the stator and the moving link of the LSD, design changes in the step of movement of the LSD, the manufacture of windings at different distances between the poles of the LSD require additional research, there is a promising direction for the development of new designs of LSD to improve the functionality, energy efficiency, and speed of the executive bodies of the means automation of technological processes of industrial production.

References

1. Yeadon, W. H., Yeadon, A. W. (2001). Handbook of Small Electric Motors. McGraw-Hill. 1040 p.
2. Gieras, I. F., Wing, M. (2002). Permanent Magnet Motors Technology. New York: Basel: Marsel Dekker. 590 p.
3. Drabek, T., Kapustka, P., Lerch, T., Skwarczynski, J. (2021). A Novel Approach to Transverse Flux Machine Construction. *Energies*, 14(22), Art. 7690; DOI: <https://doi.org/10.3390/en14227690>.
4. Luo, J., Kou, B., Yang, X., Zhang, H., Zhang, L. (2020). Development, Design and Analysis of a Dual – Consequent – Pole Transverse Flux, Linear Machine for Direct – Drive Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 68, No. 7, P. 6097–6108. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE2020.2994888>.
5. Vysokomentnye i maloinercionnye dvigateli [High-torque and low-inertia motors]. URL: <https://studopedia.org/14-12933.html> [in Ukrainian].
6. Elektrodvigateli s maloinercionnym rotorom. [Electric motors with low-inertia rotor]. URL: <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/elektrodvigateli-smaloinercionnym-rotorom.html> [in Ukrainian].
7. Kovalenko, M. A., Macyuk, D. S. (2015). Avtonomnij eksperimentalnij stend dlya viprobuvannya unipolyarnogo krokovogo dviguna na bazi mikrokontrolera [Experimental test bench for studies of unipolar stepping motor based on microcontroller]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika – Electrical engineering and elektroenergetics (E&E)*, No. 2, P. 15–20. URL: <http://periodicals.zntu.edu.ua/index.php/1607-6761> [in Ukrainian].
8. Jones, D. W. (2001). Control of Stepping Motors: Tutorial. McGraw-Hill. 70 p.
9. Krokovi dvyhuny [Stepper motors]. URL: <https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/139879> [in Ukrainian].
10. Festo Corp. Electric cylinders DNCE-LAS, with linear motor. Data Sheet, Hauppauge, NY. URL: https://www.festo.com/cat/en-us_us/data/doc_enus/PDF/US/DNCE_LAS_ENUS.PDF.
11. Moticont. Linear DC motors. Data Sheet. URL: <https://www.moticont.com/pdf/lvcm-all/pdf>.

Література

1. Yeadon W. H., Yeadon A. W. Handbook of Small Electric Motors. McGraw-Hill, 2001. 1040 p.
2. Gieras I. F., Wing M. Permanent Magnet Motors Technology. New York: Basel: Marsel Dekker, 2002. 590 p.
3. Drabek T., Kapustka P., Lerch T., Skwarczynski J. A Novel Approach to Transverse Flux Machine Construction. *Energies*. 2021. 14(22). Art. 7690; DOI: <https://doi.org/10.3390/en14227690>.
4. Luo J., Kou B., Yang X., Zhang H., Zhang L. Development, Design and Analysis of a Dual – Consequent – Pole Transverse Flux, Linear Machine for Direct – Drive Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 68, No. 7. P. 6097–6108. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE2020.2994888>.
5. Високомоментні та малоінерційні двигуни URL: <https://studopedia.org/14-12933.html>.
6. Електродвигуни з малоінерційним ротором. URL: <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/elektrodvigateli-smaloinercionnym-rotorom.html>.
7. Коваленко М. А., Мацюк Д. С. Автономний експериментальний стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера. *Електротехніка та електроенергетика*. 2015. № 2. С. 15–20. URL: <http://periodicals.zntu.edu.ua/index.php/1607-6761>.
8. Jones D. W. Control of Stepping Motors: Tutorial. McGraw-Hill, 2001. 70 p.
9. Крокові двигуни. URL: <https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/139879>.
10. Electric cylinders DNCE-LAS, with linear motor. Data Sheet, Hauppauge, NY. Festo Corp. URL: https://www.festo.com/cat/en-us_us/data/doc_enus/PDF/US/DNCE_LAS_ENUS.PDF.
11. Linear DC motors. Data Sheet. Moticont. URL: <https://www.moticont.com/pdf/lvcm-all/pdf>.

12. Panchenko, S.V. et al. (2020). Teoriy ekektricheskikh i magnitnykh kil: pidruchnik [Theory of electric and magnetic circuits; tutorial]. 2nd edition. Kharkiv: UkrDUZT. 246 p. [in Ukrainian].
13. Gnatov, A. V., Argun, Sh. V., Trunova, I. S. (2016). Teoriya elektroprivodu transportnih zasobiv: pidruchnik [Theory electric drive of transport: tutorial]. Kharkiv: HNADU. 292 p. [in Ukrainian].
14. Tkachuk, V. I., Bilyavskij, I. E., Makarchuk, O. V., Kasha, L. V., Greshchuk, O. V. (2011). Teoriya i sintez ventilnykh dvigatelej postoyannogo toka: monograph [Theory and synthesis of valve stepper motors of permanent direct current: monograph]. Lviv: Publishing house Lvivska politehnika. 288 p. [in Ukrainian].
15. Smolianinov, V. G., Suhopara, O. M. (2019). Enerhoefektyvne keruvannya liniynym krokovym prystroem [Energry efficient operation of the linear stepper device]. Visnik KNUTD – Bulletin of KNUTD, No. 4 (136), P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4> [in Ukrainian].
16. Melnykov, O. V. (2021). Proektuvannya sylovykh tranzystornykh peretvoryuvachiv enerhiyi dlya system avtomatyzovannoho elektroprivodu postiynoho strumu [Design of the power transistor energy converters for automated DC-drive systems]. Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy – Electromechanical and energy-saving systems, No. 2 (54), P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2021.2.54.31-39> [in Ukrainian].
12. Панченко С. В. та ін. Теорія електричних і магнітних кіл: підручник. 2-ге вид. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 246 с.
13. Гнатів А. В., Аргун Ш. В., Трунова І. С. Теорія електроприводу транспортних засобів: підручник. Харків, ХНАДУ, 2016. 292 с.
14. Ткачук В. І., Білявський І. Е., Макаруч О. В., Каша Л. В., Грещук О. В. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму: монограф. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 288 с.
15. Смолянiнов В. Г., Сухопара О. М. Енергоэффективное управление линейным шаговым приводом. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2019. № 4 (136). С. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4>.
16. Мельников О. В. Проектування силових транзисторних перетворювачів енергії для систем автоматизованого електроприводу постійного струму. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2021. № 2 (54). С. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2021.2.54.31-39>.

SMOLIANINOV VALERII

Candidate of Technical Sciences, Associate professor,
Department of Computer Engineering and
Electromechanics, Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1657-1479>
E-mail: 701_701@ukr.net

SUKHOPARA OLECSANDR

Candidate of Technical Sciences,
Head of sector, Research and Production
Enterprise "MTI", Kyiv, Ukraine
E-mail: sov154@ukr.net

¹СМОЛЯНИНОВ В. Г., ²СУХОПАРА О. М.

¹Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

²Науково-виробниче підприємство «МТІ», Київ, Україна

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ
ЛІНІЙНОГО КРОКОВОГО ПРИСТРОЮ**

Мета. Огляд конструкції та визначення електромагнітних параметрів лінійного крокового пристрою при покроковому пересуванні рухомого ланцюга, отримати формули в аналітичній формі для їх розрахунку та підвищення ефективності функціонування лінійного крокового пристрою.

Методика. При проведенні досліджень лінійного крокового пристрою з покроковим пересуванням рухомої ланки застосовувалась теорія електричних і магнітних ланцюгів, розрахунок електромагнітних параметрів виконаний з урахуванням конструктивних параметрів ввімкнутої секції статора лінійного крокового пристрою, що змінюються при пересуванні рухомої ланки на довжину кроку.

Результати. Розглянути конструктивні особливості n – обмоткових лінійних крокових пристроїв та проведений аналіз роботи трьохсекційної структури лінійного крокового пристрою. Виконаний аналіз змін електромагнітних параметрів магнітного ланцюга в секції ввімкнутої обмотки статора лінійного крокового пристрою, знайдена залежність магнітного опору на окремих ділянках магнітного ланцюга від конструктивних параметрів та положення рухомої ланки лінійного крокового пристрою. Встановлена відповідність змін індуктивних параметрів при пересуванні рухомої ланки, змінам електричних характеристик в секції ввімкнутої обмотки статора лінійного крокового пристрою.

Наукова новизна. Визначені інтервали змін магнітного опору при пересуванні рухомої ланки лінійного крокового пристрою на довжину кроку та отримані аналітичні вирази для їх розрахунку. Досліджено зміни індуктивних параметрів при пересуванні рухомої ланки лінійного крокового пристрою на довжину кроку, знайдені аналітичні вирази для розрахунку індуктивності та її похідної для зручності обчислень наданих в безрозмірному вигляді.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані при розробці нових конструкцій лінійних крокових пристроїв, а контроль за змінами електромагнітних параметрів та електричних характеристик в секції ввімкнутої обмотки лінійних крокових пристроїв, підвищує ефективність їх функціонування.

Ключові слова: електромагнітні параметри; магнітний опір; лінійний кроковий пристрій; рухомий ланцюг; покрокове пересування.

УДК 697.1

СУХОДУБ І. О., СЕРДЕЧНИЙ П. Ю.

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

АНАЛІЗ СЦЕНАРІЇВ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ВДЕ

Мета. Дослідження проектів підвищення рівня енергетичної ефективності громадських будівель з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для динамічного енергетичного моделювання DesignBuilder/EnergyPlus для різних рівнів енергетичної ефективності та інтеграції нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії.

Методика. В процесі дослідження заявленої проблематики проведено аналіз актуальної нормативно-правової бази України, яка окреслює та регулює підходи до оцінки енергетичної ефективності будівель та наявні програмні комплекси, використано апробовані спеціалізовані програмні комплекси для динамічного енергетичного моделювання будівель (DesignBuilder/EnergyPlus) та нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (PV*SOL premium, T*SOL).

Результати. У ході дослідницької роботи проаналізовано проекти з підвищення рівня енергетичної ефективності громадської будівлі з використанням різних сценаріїв / рівнів енергетичної ефективності та інтеграції нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. Розглянуто наступні сценарії: фактичний, базовий, запропонований та покращений запропонований. Для кожного з сценаріїв проаналізовано показники споживання кінцевої та первинної енергії на потреби опалення, охолодження, освітлення, обладнання, вентилятори та насоси, ГВП, а також викиди CO₂ та потенціал заміщення енергії з ВДЕ. В результаті впровадження заходів, що передбачені в запропонованому сценарії, споживання кінцевої енергії може зменшитися на 58,6% у порівнянні з базовим випадком, в той час як покращений запропонований сценарій може збільшити ці показники до 62,6%. Коефіцієнт заміщення теплової енергії за рахунок ВДЕ може скласти 22%, для електричної – 16% (покращений запропонований сценарій).

Наукова новизна. Використано динамічне енергетичне моделювання для розрахунку рівня енергетичної ефективності громадської будівлі для різних сценаріїв, проведено моделювання інтеграції нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії при заміщенні теплової та електричної енергії.

Практична значимість. В результаті проведення заявленого дослідження визначено потенціал економії кінцевої та первинної енергії, викидів CO₂ при впровадженні різних сценаріїв проектів підвищення рівня енергетичної ефективності та інтеграції ВДЕ, що дозволяє приймати обґрунтовані технічні рішення при проведенні комплексної модернізації громадських будівель в Україні.

Ключові слова: енергетична ефективність будівель; енергетичне моделювання будівель; динамічні моделі; відновлювані джерела енергії; DesignBuilder/EnergyPlus.

Вступ. Основним правовим документом, що окреслює сферу ефективного енерговикористання будівель в Україні є закон «Про енергоефективність будівель», який визначає юридичні, соціально-економічні та організаційні принципи у галузі забезпечення енергетичної ефективності будівель і спрямований на зниження споживання енергії в будівлях [1]. Цей правовий акт формулює основні принципи державного впливу в цій області, а саме: гарантування встановленого рівня енергетичної ефективності будівель відповідно до всіх необхідних національних стандартів, правил і методик; оцінку скорочення викидів парникових газів у атмосферу; розробка національного плану щодо впровадження та будівництва будівель з мінімальним рівнем споживання енергії; створення сприятливих умов щодо інвестицій з метою реалізації заходів із підвищення рівня енергетичної ефективності будівель, проведення реновації та термомодернізації вже існуючих будівель та використання відновлюваних джерел енергії.

Визначення енергетичної ефективності будівель впроваджується за допомогою національної методики [2], яка гармонізована відповідно до європейських стандартів та вимог у галузі енергоефективності, з врахуванням особливостей локального клімату, призначення будівлі, її геометричних особливостей та характеристик інженерних систем, мікрокліматичних умов безпосередньо у будівлі.

Вимоги до показників енергоефективності будівель, теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій (теплоізоляційної оболонки), показників енергоефективності інженерного обладнання будівель на етапах їх проектування та будівництва регламентуються відповідно до [3, 4]. Також в цих нормах наводяться критерії раціонального використання енергетичних ресурсів для опалення та охолодження будівель з метою забезпечення встановлених санітарно-гігієнічних параметрів мікроклімату у приміщеннях та забезпечення тривалої служби огорожувальних конструкцій під час експлуатації будівель.

Вимоги до проектування та рівня енергоефективності інженерних систем будівлі, зокрема систем опалення, вентиляції, кондиціонування та охолодження повітря будівель наведено в [5].

Енергетичне споживання будівлі визначається через розрахунковий або річний обсяг енергії, спожитий на опалення, враховуючи дотримання норм санітарно-гігієнічних параметрів згідно з [6]. Цей нормативний документ передбачає використання методу розрахунку енергоспоживання на основі градусо-діб (ГД). Цей метод дозволяє коригувати енергоспоживання на опалення у відповідності до середньостатистичних температур (фактичних значень) приміщень та ззовні, але в цілому є менш точним, ніж методи з врахуванням більш динамічних параметрів зовнішнього середовища та «внутрішніх» компонентів будівлі.

Методологія, запропонована європейським стандартом EN ISO 13790, який застосовується в Україні як [7], визначає підходи до розрахункового методу оцінки щорічного енергоспоживання для опалення та охолодження. Стандарт окреслює дві основні методології для розрахунку енергоспоживання при опаленні та охолодженні: квазістаціонарний метод (розрахунок на тривалість, наприклад, місяць чи опалювальний період) та динамічний метод (розрахунок за короткий проміжок часу, зазвичай одну годину).

Спрощений погодинний метод дозволяє відслідковувати зміну енергопотреб в залежності від часових інтервалів, що полегшує визначення комфортних умов у приміщенні. До недоліків наведеного методу можна віднести той аспект, що не враховуються всі компоненти, які споживають енергію, такі як гаряча вода, вентиляція та освітлення.

Вище наведені компоненти враховуються в [2]. Методика розрахунку є основою системного підходу до забезпечення енергоефективності досліджуваних будівель. Вона включає аналіз таких аспектів, як теплопередача трансмісією та вентиляцією зони опалювання чи охолодження будівлі, внутрішні та сонячні теплові навантаження, річну енергопотребу для утримання заданих температур у будівлі, а також річне енергоспоживання на опалення та охолодження, гарячу воду, освітлення та вентиляцію.

Найбільш детальнішим методом дослідження ефективності роботи енергетичних систем будівель є використання динамічних моделей. Через достатню складність таких методів актуальнішим є використання при аналізі енергоефективності спеціального програмного забезпечення. Станом на зараз найбільш поширеними та популярними наступні програмні продукти: IDA ICE, IES VE, DesignBuilder, eQuest, EnergyPlus, DOE-2.

Динамічне моделювання дає змогу аналізувати значний спектр показників енергоефективності та теплового комфорту у будівлях та легко відслідковувати рівень енергоспоживання будівель в залежності від зміни різних вхідних факторів. Серед найпоширеніших заходів з енергозбереження які приймаються в Україні є заміна застарілих

віконних конструкцій на нові. Вплив такого покращення був проаналізований у [8] саме за допомогою програмного забезпечення з динамічного моделювання. Додатковою перевагою програм з динамічного моделювання є можливість врахування впливу пасивних елементів на енергопотребу та енергоспоживання будівлі, таких як затінення вікон [9].

DOE-2 представляє собою широко використовуваний безкоштовний програмний продукт для проведення енергетичного аналізу будівель. Цей інструмент здатний прогнозувати річне використання енергії та витрати для будь-якого типу будівлі, для чого використовується деталізований опис плану будівлі, огорожувальних конструкцій, графіків роботи інженерних систем (ОВК, освітлення і т. д.) у поєднанні з погодними даними для проведення годинних моделювань рівня енергоспоживання будівлі. Особливістю DOE-2 є те, що ця програма вимагає високого рівня досвіду для ефективного використання всіх її можливостей, але водночас надає дослідникам і експертам відповідно значну гнучкість [10].

eQUEST, як повноцінна інтерактивна реалізація DOE-2, вирізняється зручним графічним інтерфейсом та додатковими функціями, які автоматизують складні завдання та спрощують взаємодію користувача з DOE-2. Програма надає можливість імпорту геометрії будівлі з готових архітектурних моделей або створення оболонки будівлі власноруч. Програма дає змогу вводити дані у спрощеному та детальному форматі [11].

EnergyPlus, який базується на кращих підходах моделювання DOE-2 та BLAST, є програмним продуктом, що використовує фізично засновані моделі для опису теплового та масового балансу в будівлі. Кожна програма включає велику кількість підпрограм, які спільно працюють для моделювання енергетичних потоків у будівлі. EnergyPlus здійснює комплексне моделювання за допомогою трьох основних компонентів: модуль теплового і масового балансу, модуль симуляції систем будівлі та сторонній інтерфейс для створення геометрії будівлі [12, 13].

IDA ICE – це комплексне програмне забезпечення для моделювання енергоефективності будівель, яке дозволяє користувачам моделювати та симулювати різні аспекти будівельної фізики, включаючи системи опалення, охолодження, вентиляції та кондиціонування повітря. Воно включає детальні теплові та енергетичні моделі для оцінки внутрішнього клімату, споживання енергії та екологічного впливу будівель. Програма дозволяє проводити динамічні симуляції, які враховують взаємодію різних компонентів та систем будівлі протягом часу. Крім того, IDA ICE підтримує параметричні дослідження та оптимізацію, що робить його цінним для дослідників, що працюють над дизайном сталих будівель та аналізом енергоефективності [14].

IES VE – це універсальний програмний пакет для аналізу енергоефективності та моделювання енергетичної ефективності будівель. Серед основних його можливостей варто виокремити аналіз енергоспоживання будівлі за різних умов для його оптимізації, оцінка інтеграції відновлювальних джерел енергії, викидів вуглецю та аналізу життєвого циклу. Також даний програмний продукт дозволяє ефективно досліджувати кілька сценаріїв проекту та проводити аналіз чутливості до різних факторів [15].

DesignBuilder є програмним інструментом, який оперує на ядрі симулятора EnergyPlus, серед функціоналу якого можна виокремити здатність аналізу викидів вуглецю, рівнів освітлення та комфорту, а також вимірювання і контроль рівня споживання енергії. DesignBuilder порівнює альтернативні конструкції будівель, використовуючи швидкий спосіб, заснований на функціях та методі порівняння результатів різних аналізів. DesignBuilder поєднує швидко тривимірне моделювання будівель з динамічним моделюванням енергії [16].

При подальшому дослідженні планується використання саме програми DesignBuilder, що має розрахункове ядро EnergyPlus. До недоліків використання цього програмного забезпечення можна віднести розбіжність кліматичних даних з чинним нормативом [17], а в

методиці розрахунку не враховуються на пряму втрати в ІТП, в трубопроводах, опалювальних приладів. Всі перелічені вище фактори ускладнюють порівняння результатів енергетичного моделювання з національною методикою визначення енергетичної ефективності будівель [2].

Постановка завдання:

- 1) проаналізувати наявні програмні комплекси, що можуть бути використані для енергетичного моделювання будівель, та обрати відповідні програми для проведення аналізу;
- 2) створення енергетичної моделі громадської будівлі в програмному середовищі DesignBuilder/EnergyPlus;
- 3) калібрування та верифікації моделі у відповідності до історичного енергоспоживання;
- 4) створення енергетичних моделей будівлі для сценаріїв: базовий, запропонований, покращений запропонований;
- 5) провести аналіз показників ефективності енерговикористання для вказаних сценаріїв;
- 6) провести аналіз інтеграції ВДЕ для громадської будівлі.

Об'єкт дослідження. Об'єктом енергетичного моделювання є будівля середньої загальноосвітньої школи м. Києва. Будівля побудована на початку другої половини ХХ ст. за типовим проектом. Будівля складається з чотириповерхової та двох одноповерхових секцій.

У школі навчається та працює близько 600 учнів та 70 робітників відповідно.

Система опалення та гарячого водопостачання є централізованими. Система опалення будівлі закрита, однотрубна з верхнім розведенням теплоносія. Наявні чавунні радіатори. Терморегулюючі головки на приладах опалення відсутні. Подача теплоносія по стоякам опалення є розбалансованою, через що є значна наявність повітряних карманів. Індивідуальний тепловий пункт (ІТП) знаходиться в гарному стані та був реконструйованим. Застосовується залежна схеми приєднання з центральними мережами, використовується триходовий клапаном та циркуляційні насоси. Наявне автоматичне погодозалежне регулювання температури подачі теплоносія.

Подача води централізована з загальноміських магістральних мереж. В будівлі була запроектована система вентиляції з видаленням та нагнітанням повітря. Під час дослідження будівлі визначено, що система вентиляції не функціонує належним чином і, відповідно, приміщення будівлі вентилуються у природній спосіб через відкриття вікон та інфільтрацію.

Загальна площа будівлі становить 7386,8 м², а загальний об'єм становить 23399,7 м³. Висота поверху становить 3,0 м. Зовнішні стіни виконані з порожнистої керамічної цегли на цементно-піщаному розчині, та є неутеплені. Частина вікон металопластикові, інша – дерев'яні. Наявні також скляні блоки. Перекриття залізобетонні. В неопалювальному горищі переkritтя утеплені шаром керамзиту. Суміщене переkritтя - без теплової ізоляції. Серед обладнання що споживає електричну енергію: насоси, прилади освітлення, офісна та побутова техніка.

Енергетичне моделювання виконувалось у програмному середовищі DesignBuilder/EnergyPlus. Першим кроком створено фактичну (actual) модель будівлі школи (рис. 1), в якій відображено фактичні параметри теплової оболонки будівлі, інженерних систем та фактичних умов експлуатації, а саме: недотримання рівня нормативних температур в приміщеннях та відсутність системи механічної вентиляції). Як ресурс кліматичних даних використовувався кліматичний файл погоди IWEC з годинним кроком дискретизації даних для м. Київ. Графік зайнятості будівлі був підібраний відповідно до [2] та становить 10 год/день з врахування вихідних та святкових днів. Фактична модель була відкалібрована відповідно до даних фактичного енергоспоживання за останні три роки.

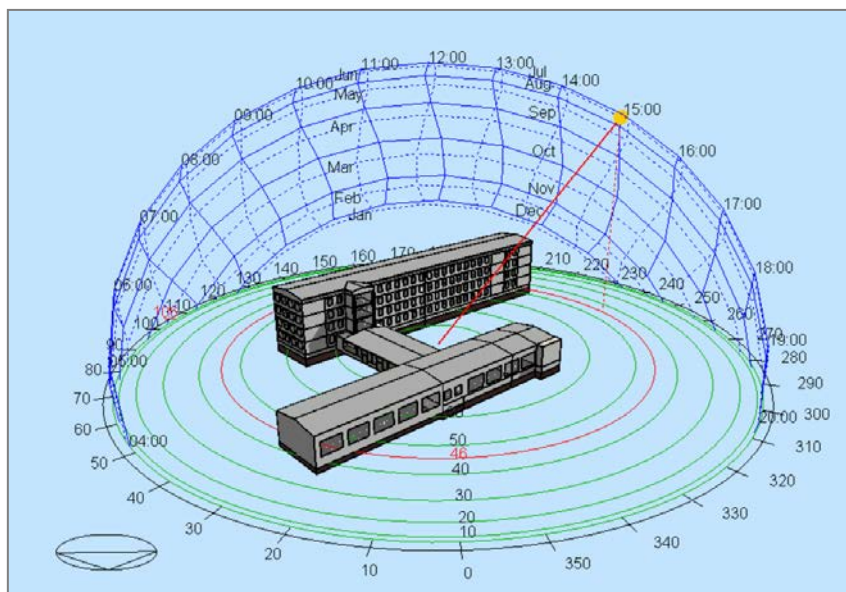


Рис. 1. Модель досліджуваної будівлі у DesignBuilder

Другим етапом дослідження фактичну модель було налаштовано під базовий (baseline) рівень енергоспоживання. Були задані показники теплового комфорту та рівень повітрообміну з використанням системи механічної вентиляції відповідно до мінімального рівня чинних нормативних документів [2, 5].

Третім етапом дослідження було підготовлено модель з запропонованим (proposed) рівнем енергоспоживання. В цій моделі термічний опір огорожувальних конструкцій було задано відповідно до чинних вимог [3], а також впроваджено утилізацію теплоти вихідного повітря в системах механічної вентиляції. Використовувався режим чергового опалення в періоди коли будівля незайнята.

Завершальним етапом дослідження було опрацьовано запропонований з покращенням (enhanced proposed) сценарій енергоспоживання. Термічний опір огорожувальних конструкцій був збільшений на 20% від характеристик застосованих у запропонованому сценаріїв. Також була підвищена ефективність системи утилізації теплоти вихідного повітря систем механічної вентиляції з врахуванням наявної (sensible) та прихованої (latent) теплоти. А також було проаналізовано рівень потенціалу заміщення спожитої енергії при використанні відновлювальних джерел енергії – фотоелектричних панелей та сонячних колекторів, розміщених на даху будівлі [18].

В таблиці 1 наведено опис теплотехнічних характеристик основних огорожувальних конструкцій будівлі школи при різних досліджуваних сценаріях.

Таблиця 1

Характеристики огорожувальних конструкцій будівлі

Показник	Значення			
	Actual	Baseline	Proposed	Enhanced proposed
1	2	3	4	5
Інфільтрація, (год ⁻¹)	0,31	0,1	0,1	0,1
Опір теплопередачі огорожувальних конструкцій R, м²K/ Вт				
Зовнішня стіна, δ=0,798 м	1,25		4,0	4,8

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Зовнішня стіна, $\delta=0,685$ м	1,05		4,0	4,8
Перекриття неопалювального горища, $\delta=0,545$ м	1,41		6,0	7,2
Суміщене перекриття, $\delta=0,627$ м	0,8		7	8,4
Перекриття неопалювального підвалу, $\delta=0,535$ м	0,76		5,0	6,0
Світлопрозорі конструкції (середньозважене)	0,445		0,9	1,08
Вхідні двері (середньозважене)	0,446		0,70	0,84
Опалювальний підвал (стіни)	Неутеплено	Вертикальне утеплення ізоляцією $\delta=100$ мм на 2 м нижче рівня ґрунту		
Підлога до ґрунту	Неутеплено	Утеплення ізоляцією 50 мм на 0,5 м нижче рівня ґрунту		

В таблиці 2 наведено опис прийнятих показників процесів діяльності пов'язаною з людьми у будівлі.

Таблиця 2

Загальні показники діяльності людей та внутрішніх теплонадходжень у будівлі

Показник	Значення			
	Actual	Baseline	Proposed	Enhanced proposed
1	2	3	4	5
Щільність заповнення людьми, людей/м ²	0,095			
Фактор приведеної метаболічної активності	0,9 – легка офісна робота			
Ізоляція одягу взимку/влітку, clo	1/0,5			
Базова температура у будівлі у період роботи, °C	17	20		
Базова температура у будівлі у неробочий час, °C	17			
Базова температура режиму охолодження, °C	-	24		
Температура чергового режиму охолодження, °C	-	27		
Питома потужність електрообладнання, Вт/ м ²	1,24	6		
Питома потужність системи освітлення, Вт/ м ²	3,6	7		

В таблиці 3 наведено опис прийнятих показників процесів опалення, вентиляції, кондиціонування та ГВП у будівлі.

Таблиця 3

Загальна інформація параметрів інженерних систем енергетичної моделі

Показник	Значення			
	Actual	Baseline	Proposed	Enhanced proposed
1	2	3	4	5
Нормативне споживання гарячої води, л/(м ² ·день)	0,275	0,896		
Коеф сезонної ефективності системи ГВП	0,85			
Нормативна кратність повітрообміну системи механічної вентиляції, год ⁻¹	-	1,5		
Коефіцієнт сезонної ефективності системи опалення	0,7		0,85	
Коеф сезонної ефективності системи охолодження	-	2,25		
Коефіцієнт ефективності рекуперації теплоти, явної (<i>sensible</i>) <u>прихованої (<i>latent</i>)</u>	-		$\frac{0,65}{-}$	$\frac{0,75}{0,75}$

Результати дослідження. Результати моделювання річного рівня споживання кінцевої енергії на опалення, освітлення, обладнання, насосів та вентиляторів та ГВП для всіх чотирьох досліджуваних сценаріїв будівлі наведені на рис. 2. Як видно з рисунку, опалення очікувано є найбільшою складовою енергоспоживання будівлі. Потреба при базовому сценарії вища за фактичний через те, що показники комфортності у будівлі (температура та вентиляція) приведені до мінімальних вимог чинних нормативних актів. Саме тому рекомендується проводити порівняння запропонованого та покращеного запропонованого сценаріїв саме з базовим. Енергопотреба на опалення знижується на 84,0% для запропонованого та на 89,9% для покращеного запропонованого сценаріїв. При впровадженні заходів з енергозбереження зростає споживання електричної енергії, що пов'язано зі збільшенням енергопотреб на охолодження. Так, потреба енергії на охолодження зростає на 77,3% для запропонованого і на 89% для покращеного запропонованого сценаріїв.

Для порівняння показників з урахуванням загального впливу на оточуюче середовище було застосовано фактори переводу кінцевої енергії в первинну відповідно до [19], яка має бути вироблена об'єктом генерації. Річне споживання первинної енергії наведено на рис. 3.

З отриманих результатів річного енергоспоживання видно, що при приведенні показників кінцевого енергоспоживання до рівня первинної енергії – пропорції систем що використовують централізоване теплопостачання співпадають між собою, а систем, які використовують електроенергію кардинально змінюються, через те, що збільшується споживання енергії необхідної для охолодження будівлі, а також через той факт, що питомі показники споживання енергії на освітлення та обладнання були приведені у відповідність до норм [2]. Загальний потенціал зниження енергоспоживання на потреби опалення та охолодження може сягати до 60%.

Для зручності аналізу результатів річне споживання первинної енергії було приведено до опалювальної площі будівлі. Результати наведено на рис. 4.



Рис. 2. Річне споживання кінцевої енергії громадської будівлі



Рис. 3. Річне споживання первинної енергії громадської будівлі

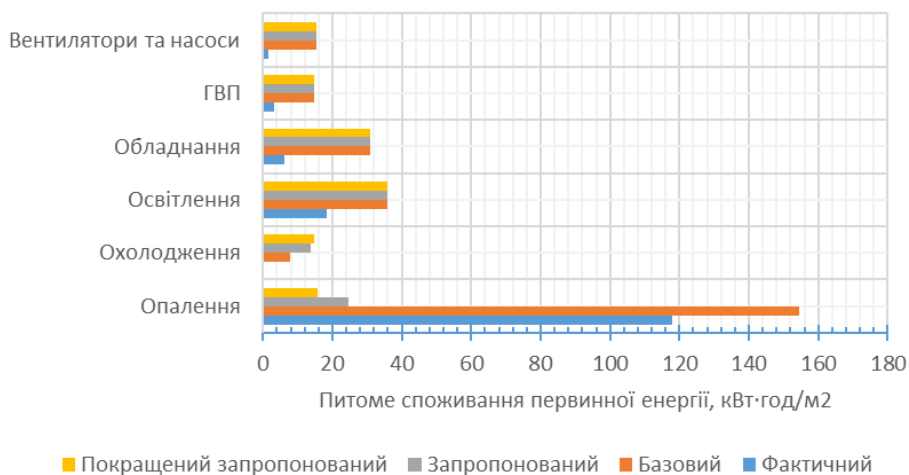


Рис. 4. Річне питоме споживання первинної енергії

Також було проведено оцінку рівня викидів парникових газів (CO₂) відповідно до [19]. Спостерігається скорочення викидів парникових газів 50,9% для запропонованого та 54,3% для покращеного запропонованого сценаріїв споживання енергії відносно базового рівня. Результати зображено на рис. 5.

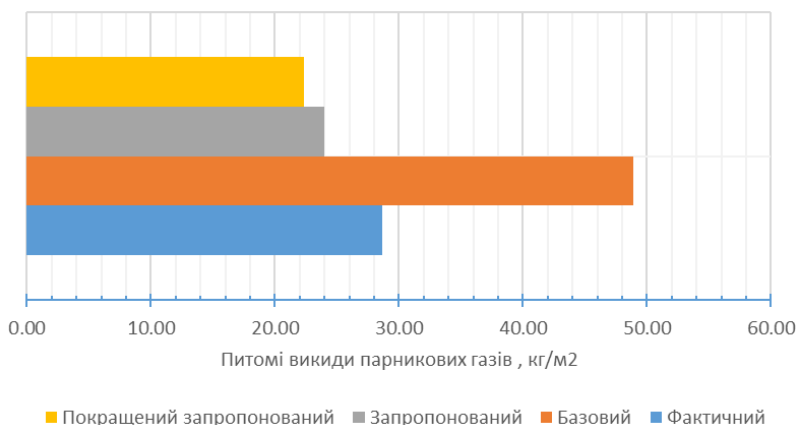


Рис. 5. Річні питомі викиди парникових газів

Можливий потенціал заміщення спожитої теплової та електричної енергії за рахунок використання сонячних колекторів на потреби ГВП та дахової фотоелектричної станції наведено на рис. 6 та 7 відповідно.

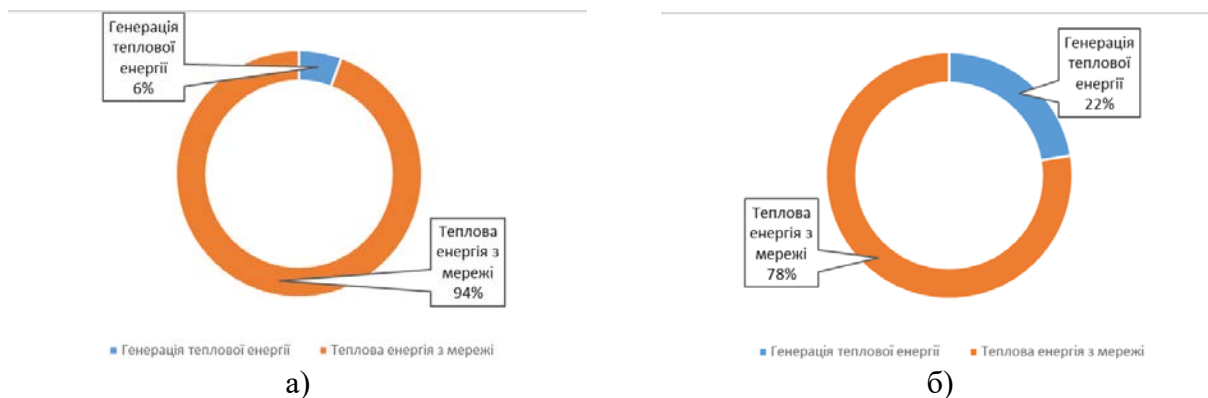


Рис. 6. Потенціал заміщення споживання теплової енергії за рахунок ВДЕ (сонячні колектори на ГВП): а) фактичний сценарій, б) покращений запропонований сценарій

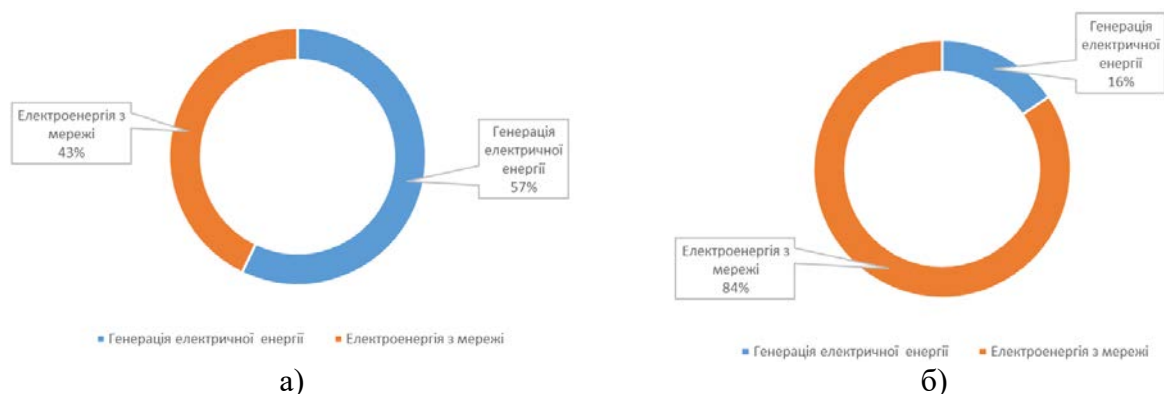


Рис. 7. Потенціал заміщення споживання електричної енергії за рахунок ВДЕ (дахова сонячна електростанція): а) фактичний сценарій, б) покращений запропонований сценарій

Висновки. В статті наведено дослідження сценаріїв підвищення рівня енергетичної ефективності та інтеграції ВДЕ для громадської будівлі у м. Київ з використанням спеціалізованого програмних продуктів для динамічного енергетичного моделювання будівель (DesignBuilder/EnergyPlus) та нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (PV*SOL premium, T*SOL). Розглядалися чотири сценарії для будівлі: фактичний, базовий, запропонований та покращений запропонований. Запропонований сценарій передбачав дотримання поточних вимог до характеристик оболонки будівлі та впровадження рекуперації теплоти в системах вентиляції, в той час як покращений запропонований – покращення опору теплопередачі на 20% у порівнянні з вимогами, встановлення більш ефективної системи вентиляції з рекуперацією та впровадження ВДЕ на потреби ГВП та електроспоживання. В результаті впровадження заходів, що передбачені в запропонованому сценарії, споживання кінцевої енергії може зменшитися на 58,6% у порівнянні з базовим випадком, в той час як покращений запропонований сценарій може збільшити ці показники до 62,6%. Коефіцієнт заміщення теплової енергії за рахунок ВДЕ може складати 22%, для електричної – 16% (покращений запропонований сценарій).

В подальшому планується детальне дослідження характеристик оболонки будівлі з врахування теплопровідних включень та їх вплив на енергетичні характеристики будівлі.

References

Література

1. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy [On energy efficiency of buildings: Law of Ukraine dated June 22, 2017 No. 2118-VIII]. *Holos Ukrainy*, 22/07/2017, № 134 [in Ukrainian].
2. DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pid chas opalennia, okhолоdzhennia, ventyliatsii, osvittlennia ta hariachoho vodopostachannia [Energy Efficiency of Buildings. Calculation Method of Energy Consumption for Heating, Cooling, Ventilation, Lighting, and Hot Water Supply]. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC". 199 p. [in Ukrainian].
3. DBN V.2.6–31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal Insulation and Energy Efficiency of Buildings]. Kyiv: State Enterprise "Ukrarhbudinform". 23 p. [in Ukrainian].
4. Pro zatverdzhennia Minimalnykh vymoh do enerhetychnoi efektyvnosti budivel: nakaz Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy [Approval of Minimum Requirements for Energy Efficiency of Buildings: Order of the Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine dated 27.10.2020 № 260]. *Ofitsiinyi visnyk Ukrainy = Official Gazette of Ukraine*, 2021, № 1, P. 408 [in Ukrainian].
5. DBN V.2.5-67:2013. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsiuvannia [Heating, Ventilation, and Air Conditioning]. Kyiv: Ukrarhbudinform. 149 p. [in Ukrainian].
6. DSTU_N B A.2.2.5:2007. roektuvannia. Nastanova z rozroblennia ta skladannia enerhetychnoho pasporta budynkiv pry novomu budivnytstvi ta rekonstruktsii
1. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 р. №2118-VIII. *Голос України*. 22.07.2017. № 134.
2. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. На заміну ДСТУ Б А.2.2-12:2015; чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2022. 199 с.
3. ДБН В.2.6–31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. На заміну ДБН В.2.6–31:2016; чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2021. 23 с.
4. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27.10.2020 р. № 260. *Офіційний вісник України*. 2021. № 1. С. 408.
5. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання. Чинний від 2014–01–01. Вид. офіц. Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2013. 149 с.
6. ДСТУ_Н Б А.2.2.5:2007. Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при

- [Designing. Guidelines for the Development and Compilation of Energy Passports of Buildings for New Construction and Reconstruction]. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, Housing and Communal Services of Ukraine. 44 p. [in Ukrainian].
7. DSTU B EN ISO 13790:2011. Enerhoefektyvnist budivel. Rozrakhunok enerhospozhyvannia pry opalenni ta okhologdzhenni [Energy Efficiency of Buildings. Calculation of Energy Consumption for Heating and Cooling]. Kyiv: NDIKB. 229 p. [in Ukrainian].
8. Buyak, N., Deshko, V., Bilous, I., Gureev, M., Holubenko, O. (2020). Assessment of the window replacement influence on building energy consumption and human thermal comfort on the basis of dynamic modeling. *Refrigeration Engineering and Technology*, 55(5–6), 282–292. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i5-6.1656>.
9. Bilous, I., Deshko, V., Buyak, N., Sapunov, A. (2024). Vplyv zatinennia vikon na enerhopotrebu ta riven teplovoho komfortu v litnii period dlia doshkilnoho navchalnoho zakladu [Influence of Window Shading on Energy Consumption and Thermal Comfort Level in the Summer Period for a Preschool Educational Institution]. *Refrigeration Engineering and Technology*, 59(4). DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2734> [in Ukrainian].
10. DOE-2. Building Energy Use and Cost Analysis Tool. URL: <http://doe2.com/DOE2/index.html>.
11. DOE-2. eQUEST the Quick Energy Simulation Tool. URL: <https://www.doe2.com/equest/>
12. Crawley, D. B., Lawrie, L. K. et al. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33, 319–331.
13. Crawley, D. B., Lawrie, L. K. et al. (2001). EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program. *Seventh International IBPSA Conference* (August 13-15, 2001, Rio de Janeiro).
14. IDA ICE Simulation Software. URL: <https://www.equa.se/en/ida-ice>.
15. IES VE Simulation Software. URL: <https://www.iesve.com/software/virtual-environment>.
16. DesignBuilder Software Package. URL: <https://designbuilder.co.uk/software/product-overview>.
17. DSTU-N B V.1.1–27:2010. Budivselna klimatohiia [Building Climatology]. Kyiv: Ukrarhbudininform. 123 p. [in Ukrainian].
18. Deshko, V. I., Sukhodub, I. O., Serdechny, P. Y. (2019). Vykorystannia enerhetychnoho modeliuvannia budivel pry novomu budivnytstvi ta rekonstruktsii. Uvedeno vperше; chynnyi vid 2008.07.01. K.: Minregionbud Ukraini, 2008. 44 s.
7. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні. На заміну ГОСТ 26629.85; чинний з 01.01.2013. К.: НДІБК, 2011. 229 с.
8. Buyak N., Deshko V., Bilous I., Gureev M., Holubenko O. Assessment of the window replacement influence on building energy consumption and human thermal comfort on the basis of dynamic modeling. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2020. No. 55 (5–6). P. 282–292. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i5-6.1656>.
9. Білоус І., Дешко В., Буяк Н., Сапунов А. Вплив затінення вікон на енергопотребу та рівень теплового комфорту в літній період для дошкільного навчального закладу. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. № 59(4). <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2734>.
10. Building Energy Use and Cost Analysis Tool. DOE-2. URL: <http://doe2.com/DOE2/index.html>.
11. eQUEST the Quick Energy Simulation Tool. DOE-2. URL: <https://www.doe2.com/equest/>
12. Crawley D. B., Lawrie L. K. et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*. 2001. Vol. 33. P. 319–331.
13. Crawley D. B., Lawrie L. K. et al. EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program. *Seventh International IBPSA Conference* (August 13-15, 2001, Rio de Janeiro).
14. IDA ICE Simulation Software. URL: <https://www.equa.se/en/ida-ice>.
15. IES VE Simulation Software. URL: <https://www.iesve.com/software/virtual-environment>.
16. DesignBuilder Software Package. URL: <https://designbuilder.co.uk/software/product-overview>.
17. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010. Будівельна кліматологія: чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Київ: Укрархбудінформ, 2011. 123 с.
18. Дешко В. І., Суходуб І. О., Сердечний П. Ю. Використання енергетичного

rozrobsi proektiv z pidvyshchennia enerhoefektyvnosti [Using Building Energy Modeling in Projects for Increasing Energy Efficiency]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii Tekhnichni nauky* = *Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Sciences Series*, 4(136), 86–96 [in Ukrainian].

19. Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel: nakaz Ministerstva rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [Approval of the Methodology for Determining the Energy Efficiency of Buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine dated 11.07.2018 № 169]. *Ofitsiinyi visnyk Ukrainy* = *Official Gazette of Ukraine*, 2018, № 55, P. 301 [in Ukrainian].

модельовання будівель при розробці проєктів з підвищення енергоефективності. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 4 (136). С. 86–96.

19. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 169. *Офіційний вісник України*. 2018. № 55. С. 301.

SUKHODUB IRYNA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-5895-1306>
Scopus Author ID: 57140834000
ResearcherID: I-9788-2017
E-mail: ira_krot@ukr.net

SERDECHNYI PAVLO

Postgraduate,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9557-6800>
E-mail: p.serdechnyi@gmail.com

SUKHODUB I. O., SERDECHNYI P. Yu.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
**ANALYSIS OF SCENARIOS FOR INCREASING THE LEVEL OF ENERGY
EFFICIENCY OF PUBLIC BUILDINGS WITH INTEGRATION OF RES**

Purpose. The study aims to investigate projects aimed at increasing the level of energy efficiency of public buildings using specialized software for dynamic energy modeling, DesignBuilder/EnergyPlus, for various levels of energy efficiency and integration of non-traditional and renewable energy sources.

Methodology. In the process of researching the stated problem, the current regulatory framework of Ukraine, which describes and regulates approaches to assessing the energy efficiency of buildings and available software complexes, were analyzed. Proven specialized software for dynamic energy modeling of buildings (DesignBuilder/EnergyPlus) and non-traditional and renewable energy sources (PVSOL premium, TSOL) were used.

Findings. During the research work, projects aimed at increasing the level of energy efficiency of a public building using different scenarios/levels of energy efficiency and integration of non-traditional and renewable energy sources were analyzed. The following scenarios were considered: actual, baseline, proposed, and enhanced proposed. For each scenario, indicators of final and primary energy consumption for heating, cooling, lighting, equipment, fans and pumps, hot water supply, as well as CO₂ emissions and the potential for energy substitution from RES were analyzed. As a result of the implementation of measures provided for in the proposed scenario, the consumption of final energy can decrease by 58.6% compared to the baseline case, while the enhanced proposed scenario can increase these indicators to 62.6%. The coefficient of substitution of thermal energy by RES can be 22%, for electricity – 16% (enhanced proposed scenario).

Scientific novelty. Dynamic energy modeling was used to calculate the level of energy efficiency of a public building for different scenarios, and modeling of the integration of non-traditional and renewable energy sources when replacing thermal and electrical energy was conducted.

Practical value. As a result of the conducted research, the potential for saving final and primary energy, CO₂ emissions when implementing various scenarios of projects aimed at increasing the level of energy efficiency and integrating RES was determined, allowing to make informed technical decisions during the comprehensive modernization of public buildings in Ukraine.

Keywords: building energy efficiency; building energy modeling; dynamic models; renewable energy sources; DesignBuilder/EnergyPlus.

УДК 621.31:
535.215

ШАВЬОЛКІН О. О., ПІДГАЙНИЙ М. О.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ САМОСПОЖИВАННЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ З РЕГУЛЮВАННЯМ СПОЖИВАННЯ

Мета. Удосконалення управління гібридної фотоелектричної системи житлового будинку з кондиціонером та регульованим електричним бойлером для нагрівання води шляхом підвищення ступеню використання енергії фотоелектричної батареї на споживання, розвиток принципів реалізації системи управління енергоспоживанням з використанням прогнозу.

Методика. Аналіз можливостей застосування кондиціонера при різних температурах повітря та генерації фотоелектричної батареї за статистичними даними. Аналіз температурних режимів бойлера з урахуванням енергоспоживання кондиціонера та характеру зміни його потужності у часі. Використання комп'ютерного моделювання для оцінювання результатів.

Результати. Розроблено структуру блоку регулювання потужності бойлера з вирівнюванням споживання в часі та алгоритм управління температурним режимом бойлера за прогнозом генерації фотоелектричної батареї та температури повітря.

Наукова новизна. Розвинуто спосіб реалізації регулювання потужності бойлера з вирівнюванням графіку загальної потужності споживання в часі. Розвинуто принцип реалізації системи управління енергоспоживанням з використанням прогнозу температури повітря та генерації фотоелектричної батареї для завдання температурних режимів бойлера. Це сприятиме підвищенню використання енергії фотоелектричної батареї та зменшенню споживання електроенергії з мережі.

Практичне значення. Отримані рішення є основою для проектування фотоелектричних систем для самоспоживання приватних будинків в разі застосування електричного бойлера в системі забезпечення теплою водою та кондиціонеру.

Ключові слова: гібридна фотоелектрична система; регулювання потужності бойлера; вирівнювання потужності в часі; управління за прогнозом; моделювання енергетичних процесів.

Вступ. Використання відновлювальної енергії зараз є глобальною світовою тенденцією розвитку людства. Виробництво «зеленої» електроенергії постійно зростає, це стосується і побутових споживачів. Важливим аспектом є максимальне використання цього ресурсу на споживання. Інтерес щодо досягнення максимального самоспоживання електроенергії відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) для локальних гібридних систем, підключених до мережі, зростає серед власників систем і в науковій спільноті. До того ж, у низці країн Європи відмовляються від стимулювання локалізованого виробництва електроенергії від невеликих фотоелектричних систем (ФЕС). Виключення експорту надлишкової енергії в разі повного споживання дозволить знизити навантаження на розподільчі мережі електроенергії. Таким чином, самоспоживання є важливою моделлю використання локальних систем з ВДЕ, особливо, в разі відсутності пільгових тарифів. Отже, підвищення ступеня використання енергії ВДЕ в приватному секторі для зниження витрат на електроенергію, що споживається, при зниженні експорту в мережу, аж до його повного виключення, є актуальним завданням.

Аналіз попередніх досліджень. У оглядовій роботі [1] узагальнюються існуючі дослідження щодо самоспоживання енергії ФЕС для житлових систем. За цього пропонується визначати самоспоживання як частку загального обсягу фотоелектричної енергії, безпосередньо споживану власником ФЕС. Визначається два основних чинники збільшення власного споживання. Це зберігання енергії та управління навантаженням (або керуванням попитом). Розвиток цієї роботи представлено в [2]. У роботі [3] також зазначається, що вирішення проблем енергетичного балансу в житлових будинках з ФЕС пов'язано зі скороченням експорту енергії в мережу та збільшенням її локального споживання. Обмеження

експорту надлишкової енергії в мережу до повного його виключення є функцією, що передбачають сучасні гібридні інвертори для ФЕС побутових споживачів [4, 5].

В роботі [6] зазначено, що найбільша частка (до 65%) споживання енергії у житлових будинках посідає опалення приміщень, зокрема, 15% використовується на нагрівання побутової води. Це ж констатують у роботі [7], де зазначено, що освітлення та опалення, вентиляція та кондиціонування є основною складовою загального енергоспоживання будівель. Ця обставина визначає напрям більшості робіт.

Оптимізацію фотоелектричного споживання з використанням систем гарячого водопостачання розглянуто в роботі [8]. За цього надлишкове виробництво ФЕС зберігається у резервуарі з гарячою водою як тепла енергія. При заповненні резервуара надлишок фотоелектричної енергії продається в мережу. Автори наголошують на великому потенціалі електрифікованих систем гарячого водопостачання для використання енергії ФЕС за рахунок управління енергоспоживанням. Однак використання додаткового резервуара-накопичувача не завжди можливе. А продаж надлишку фотоелектричної енергії у мережу зберігається. І це матиме місце влітку, коли генерація фотоелектричної батареї (ФБ) є максимальною. Планування часу роботи побутової техніки в роботі [9] представлено як одна з найбільш ефективних стратегій управління домашнім енергоспоживанням. За цього можна змістити час роботи побутових приладів на період високої генерації ФЕС. Системи зберігання енергії, зокрема, акумуляторні батареї (АКБ) доцільно використовуватися для заряджання у періоди низьких цін, а також при надлишку фотоелектричної енергії. Розрядка можлива в періоди високих цін та нестачі енергії ФЕС.

В роботі [10] досліджується потенціал управління попитом шляхом зсуву часу попиту електроенергію. На прикладі побутової посудомийної машини демонструється можливість збільшення відновлюваної електроенергії, що споживається, з одночасною фінансовою економією для споживача. Також можливе зниження попиту в години пік більш як на 60%. Автори [5] вважають, що такі важливі навантаження, як освітлення та опалення, вентиляція та кондиціонування можна безперервно регулювати за допомогою регулювання яскравості, термостатування та/або керування швидкістю вентилятора. Таким чином, перспективним є активне управління попитом із регулюванням енергоспоживання. Перспективність використання навантаження з регульованою потужністю як елемента системи оптимізації енергоспоживання стверджується також в роботі [11].

В роботі [12] поєднано використання планування енергоспоживання приватного будинку з використанням сценаріїв та використанням електричного накопичувального бойлеру з регульованою потужністю. За цього розглянуто підвищення ступеня споживання енергії фотоелектричної батареї (ФБ). Проте автори обмежилися реалізацією управління з формування стану заряду АКБ $SoC(t)$ при генерації ФБ вище літньої середньомісячної з використанням кондиціонеру. Не вирішено питання керування температурними режимами бойлеру при зміні генерації ФБ та продуктивності кондиціонеру. Також розгляд обмежено використанням інверторного кондиціонеру з рівномірним споживанням енергії в часі згідно продуктивності.

Підвищення ступеня використання енергії ВДЕ на споживання можливе за умови використання прогнозу генерації ФБ. У роботі [13] представлено рішення з використанням прогнозу генерації ФБ для формування графіка $SoC(t)$ АКБ. Використовуються дані прогнозу генерації одного з веб-ресурсів [14, 15]. Застосовується дане рішення, коли генерація ФБ є недостатньою для забезпечення навантаження об'єкту і недостатня енергія споживається з мережі.

Постановка завдання. Підвищення ступеню використання енергії ФБ в гібридній системі електроживлення житлового будинку для забезпечення власних потреб є можливим за удосконаленням управління бойлеру системи тепловодопостачання. За цього потребує вирішення ряд питань щодо: можливостей використання з різними типами кондиціонерів;

врахування прогнозу генерації ФБ та температури повітря в процесі керування температурними режимами бойлера та формування SoC(t) АКБ.

Мета роботи полягає у вдосконаленні управління гібридною ФЕС для житлового будинку с кондиціонером та регульованим електричним бойлером для нагрівання води шляхом підвищення ступеня споживання фотоелектричної енергії та зниження витрат на електроенергію.

Завдання для вирішення:

- виконати оцінку можливостей використання кондиціонера за різної генерації ФБ та температури повітря з використанням статистичних даних;
- розробити алгоритм управління температурними режимами бойлера у всьому діапазоні змінювання генерації ФБ та енергоспоживання кондиціонера за використанням даних прогнозу генерації ФБ та температури повітря;
- обґрунтувати реалізацію управління потужністю бойлера в разі використання кондиціонеру, продуктивність якого регулюється змінюванням тривалості режимів максимальної та мінімальної потужності;
- виконати моделювання з оцінкою ефективності запропонованих рішень.

Основні матеріали дослідження. Розглядається гібридна ФЕС приватного жилого будинку. За основу прийнято систему, наведену в роботі [12], з використанням електричного накопичувального бойлера для забезпечення теплою водою та кондиціонера. Для можливості зіставлення отриманих результатів розглядаються ті ж графіки електроспоживання та споживання теплої води. Як і в роботі [12], для спрощення розглядається сконцентроване споживання трьох обсягів теплої води протягом дня: вранці, вдень та ввечері. Графіки температури води в бойлері t наведено на рис.1 при поділі на інтервали часу: ранок (t_1, t_2), денний час (t_2, t_3), вечір (t_3, t_4). Потужність електроспоживання має ранковий (t_1, t_2) та вечірній пік (t_4, t_5). Також збережено концепцію використання для нагрівання води надлишкової енергії ФБ, яка не використовується на споживання навантаженням та заряд АКБ. Це є можливим на інтервалі (t_2, t_3), коли генерація ФБ достатня. При високій генерації ФБ також переслідується завдання максимального заряду АКБ у денний час з подальшим використанням у вечірній час та години вечірнього піку для зниження споживання з мережі.

Аналіз архівних даних генерації ФБ та температури повітря t_B для літнього періоду (2016 рік) показує, що висока генерація $W_{PV} > 5$ кВт (максимальна 6 кВт) мала місце 30 днів. При цьому температура змінювалася від 24 °C (прийнято як нижнє значення температури, коли включається кондиціонер) до 34 °C: протягом 6 днів середнє значення температури (с 11:00 до 20:00) 24–26 °C; 15 днів – 26–29 °C; 7 днів – 26–29 °C. Таким чином, кондиціонер використовується з регулюванням продуктивності у досить широкому діапазоні. Генерація ФБ лише на рівні середньомісячних значень мала місце переважно при температурах 24–28 °C.

При тому самому значенні генерації ФБ температура повітря може істотно відрізнятися. При цьому можливе функціонування з кондиціонером та без кондиціонера. Крім того, кондиціонер може включатись у різний час. Розглянемо роботу системи з використанням прогнозу потужності генерації ФБ P_{PV} та температури повітря t_B з дискретністю 1 час. Для цього блок керування доповнено wi-fi модулем для зв'язку з веб-ресурсом [14, 15] та модулем розрахунку для керування температурним режимом бойлера.

Використання без кондиціонера ($t_B < 24$ °C). Надлишкова енергія ФБ на нагрівання води у бойлері W_{B23} на інтервалі (t_2, t_3)

$$W_{B23} = W_{PV23} \cdot \eta_C - W_{L23}, \quad (0)$$

де W_{PV23} – розрахункове значення енергії ФБ на інтервалі;

W_{L23} – розрахункове значення енергії, що споживається навантаженням;

η_C – ККД перетворювача енергії.

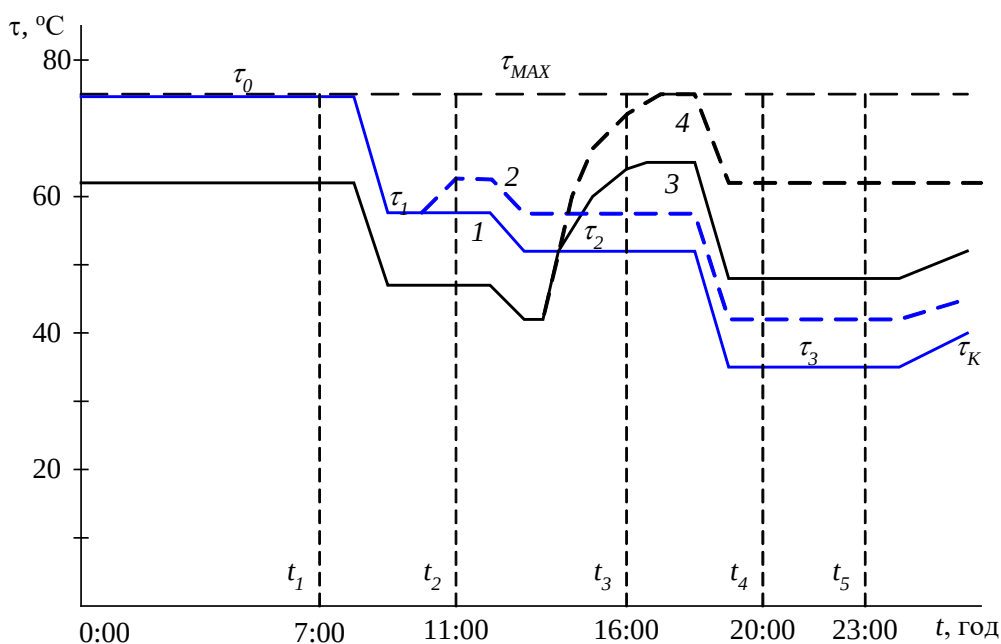


Рис. 1. Графіки температурних режимів води у бойлері за добу

Якщо $W_{Б23} \leq 0$ нагрівання не здійснюється і в міру витрати теплої води температура води в бойлері знижується. Навіть якщо початкове значення температури τ_0 дорівнює максимальному значенню 75 °С, значення температури води у бойлері ввечері τ_3 буде нижче за комфортне значення 37 °С (крива 1 на рис. 1). Це є неприпустимим і необхідно використовувати додаткове нагрівання $\Delta W_{БД} = c \cdot V \cdot \Delta \tau$ (c – теплоємність води, V – об'єм води в бойлері). Для прийнятого графіка витрат теплої води значення $\Delta \tau \geq 3$ °С. Нагрівання здійснюється на інтервалі (t_1, t_2) (на рис. 1 (крива 2) або (t_2, t_3)), нагрівання до значення τ_0 здійснюється вночі. Також передбачено незалежне додаткове нагрівання води при зниженні температури нижче 38 °С до значення $\tau_{MIN} = 40$ °С. Це компенсує перевищення споживання вище за прийнятий графік.

Значення $W_{Б23} > 0$. При $W_{Б23} \leq \Delta W_{БД}$ енергія на додаткове нагрівання знижується. За умови максимального використання надлишкової енергії ФБ на нагрівання води при $W_{Б23} > \Delta W_{БД}$ значення τ_2 має мати мінімально можливе значення. При цьому $W_{Б23MAX} \leq c \cdot V \cdot (\tau_{MAX} - \tau_{MIN})$, що відповідає кривій 4 на рис. 1. Використання з кондиціонером ($t_B > 24$ °С).

В роботі [12] розглянуто використання інверторного кондиціонера, коли енергоспоживання є рівномірним та потужність відповідає його продуктивності. Водночас широко поширені кондиціонери, в яких регулювання продуктивності здійснюється зміною тривалості режиму максимальної та мінімальної потужності. При цьому за цикл роботи $T = \Delta t$ (рис. 2) маємо час t_{on} , коли потужність кондиціонера $P_K = P_{KR}$ (P_{KR} – номінальна потужність). Середнє значення потужності $P_{KC} = \gamma P_{KR}$ ($\gamma = t_{on} / T$). При цьому значення P_{KR} є досить велике (у роботі [12] $P_{KR} = 980$ Вт), що призводить до значних коливань потужності навантаження $\Delta P_L = (P_{LMAX} - P_{LMIN}) \approx 1$ кВт. Це особливо проявляється при стані заряду АКБ $Q^* > Q_d^*$ ($Q^* = Q/Q_R$ – стан заряду SoC (%), $Q = Q_0 + \int I_B dt$, Q_0^* – початкове значення, Q_R – відповідає ємності АКБ C_B (А·год), Q_d^* – відповідає переходу в режим заряду з постійною напругою при зниженні струму заряду I_B [16]), коли ΔP_L значно перевищує потужність заряду АКБ. Це при виключенні експорту енергії в мережу зумовлює необхідність зниження потужності генерації ФБ та призводить до неповного використання енергії ФБ на споживання.

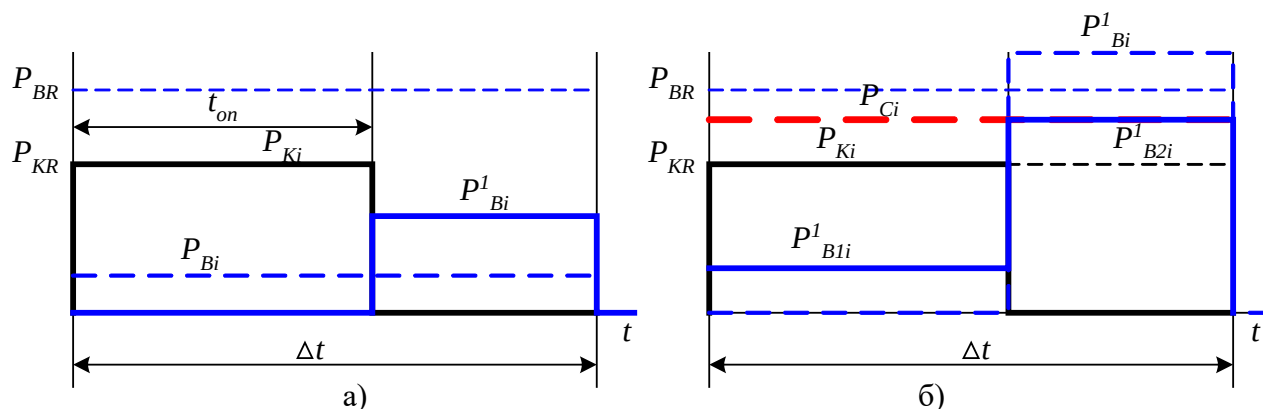


Рис. 2. Принцип вирівнювання сумарної потужності бойлера та кондиціонера при:
а) $P^1_{Bi} \leq P_{KR}$; б) $P^1_{Bi} > P_{KR}$

Таким чином, при регулюванні потужності бойлера по відхиленню Q^* щодо заданого значення $Q^*_R(t)$ виникає додаткове завдання – забезпечити вирівнювання потужності споживання у часі. При розглянутому співвідношенні максимальних значень потужності бойлера $P_{BR} = 1.5$ кВт та кондиціонера $P_{KR} = 980$ Вт ($P_{BR} > P_{KR}$) це реально. Сумарна потужність у цьому випадку $(P_B + P_K) \leq P_{BR}$.

Принцип вирівнювання сумарної потужності бойлера та кондиціонера на інтервалі дискретності регулювання потужності бойлера ілюструє рис. 2. Крок дискретності регулювання потужності бойлера $\Delta t = T$ задається циклом роботи кондиціонера за вимірним значенням його потужності. Потужність бойлера на i -тому інтервалі дискретності задається регулятором [12] за відхиленням стану заряду АКБ Q^* відносно заданого графіка $Q^*_R(t)$ як

$$P_{Bli} = \begin{cases} K(Q^*_R - Q^*_M), & \text{if } (Q^*_R - Q^*_M) < 0 \\ 0, & \text{if } (Q^*_R - Q^*_M) \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

де Q^*_M – вимірне значення;

K – коефіцієнт підсилення регулятора.

Значення P_{Bi} перераховується до тривалості інтервалу, що відповідає вимкненому стану кондиціонера

$$P^1_{Bi} = \frac{P_{Bi}}{1 - \gamma}. \quad (2)$$

Значення потужності бойлера для інтервалу t_{on} (при обмеженні $P_{Bli} \leq (P_{BR} - P_{KR})$)

$$P_{Bli} = \begin{cases} (P^1_{Bi} - P_{KR})(1 - \gamma), & \text{if } P^1_{Bi} > P_{KR} \\ 0, & \text{if } P^1_{Bi} \leq P_{KR}. \end{cases} \quad (3)$$

Значення потужності бойлера для інтервалу вимкнення кондиціонера

$$P_{B2i} = \begin{cases} ((P^1_{Bi} - P_{KR})(1 - \gamma) + P_{KR}), & \text{if } P^1_{Bi} > P_{KR} \\ P^1_{Bi}, & \text{if } P^1_{Bi} \leq P_{KR}. \end{cases} \quad (4)$$

Зазначимо, що у цьому варіанті порівняно з використанням інверторного кондиціонера маємо зниження граничної сумарної потужності бойлера та кондиціонера P_{CI} . Так при $\gamma = 0.6$ отримуємо $P_{CI} = 1.5$ кВт, при інверторному кондиціонері $P_{C2} = \gamma P_{KR} + P_{BR} = 2088$ Вт. Це

призводить до обмеження рівня підвищення споживання. Компромісним є підвищення межі $P_{Bli} \leq (bP_{BR} - P_{KR})$ при значенні b залежно від прогнозу генерації ФБ від $b = 1.1$ до $b = 1.3$. Це дає можливість збільшувати P_{Cti} при підвищенні генерації ФБ та незначному коливанні сумарної потужності.

Задання температурного режиму. На момент часу t_2 (11:00), коли вже досить жарко і планується включення кондиціонера, його енергоспоживання невідоме. Можливе наступне рішення. Оцінюється фактичне (вимірне) значення стану заряду АКБ Q^*_2 , формується графік $Q^*_R(t)$ з розрахунку $Q^*_3 \rightarrow 100\%$ з дискретністю 0,5 час [12]. Згідно $\Delta Q^*_{23} = (Q^*_3 - Q^*_2)$ визначається енергія на заряд АКБ

$$\Delta W_{B23} = 0.01 \Delta Q^*_{23} W_B / \eta_C \eta_B,$$

де $W_B = C_B \cdot U_B$ – енергоємність АКБ;
 η_B – ККД акумуляторної батареї.

Надлишкова енергія ФБ на інтервалі. (t_2, t_3) , яка може використовуватися для нагрівання бойлера

$$W_{B23} = W_{PV23} \cdot \eta_C - W_{L23} - \gamma P_{KR}(t_3 - t_2) - \Delta W_{B23}. \quad (5)$$

Розглядаємо граничний випадок для $\gamma = 1$.

При $W_{B23} > 0$ має місце повний заряд АКБ та нагрівання бойлера. Прийнятому графіку обсягів споживання теплої води відповідає енергія, що споживається на нагрівання W_{BM} , в даному випадку $W_{BM} = 3880$ Вт. Це значення енергії забезпечує добовий баланс температури води в бойлері при $\tau_0 = \tau_K$. Отримане згідно (5) значення W_{B23} при $W_{B23} \leq W_{BM}$ визначає температуру нагрівання води $\Delta \tau_{23} = W_{B23} / cV$. У разі перевищення частина енергії ФБ, яка дорівнює $(W_{B23} - W_{BM})$ буде не використана.

З урахуванням значення $\Delta \tau_{23}$ графік нагрівання набуває вигляду кривої 3 або 4 на рис. 1. При цьому значення τ_0, τ_3 визначаються за умов

$$\tau_3 = ((\tau_{2MIN} + \Delta \tau_{23}) - \Delta \tau_3) \geq \tau_{MIN}, \quad \tau_0 = \tau_{2MIN} + \Delta \tau_2 + \Delta \tau_1,$$

де $\Delta \tau_2, \Delta \tau_1, \Delta \tau_3$ – зниження температури води у бойлері для прийнятих обсягів споживання води на інтервалах протягом дня.

Якщо фактичне значення $\gamma < 1$ графік зберігається у частині значень τ_0, τ_1, τ_2 , значення W_{B23} і $\Delta \tau_{23}$ збільшуються.

При $W_{B23} \leq 0$ значення $\Delta \tau_{23} = 0$ маємо графік 2 (рис. 1) з додатковим нагріванням. Додаткове нагрівання здійснюється на інтервалі 12:00–13:00. Якщо кондиціонер не ввімкнувся, додаткове нагрівання не використовується. При генерації ФБ нижче 0.5 щодо середньомісячної літом вводиться обмеження стану заряду АКБ $Q^*_{MIN} \geq 50\%$, що має на меті підвищити термін його експлуатації.

Результати моделювання. Моделювання енергетичних процесів виконано з використанням моделі [12], яка доповнена блоком формування заданого значення потужності бойлера відповідно до (1) – (4).

Розглянуто варіанти керування з вирівнюванням потужності бойлера та без вирівнювання. Дані наведені в табл. 1 при енергоспоживанні кондиціонера $\gamma = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ для літніх днів з максимальною генерацією ФБ та генерацією близькою до середньомісячної. При цьому враховувався додатковий підігрів води, необхідний для підтримки температурного режиму для прийнятого графіка споживання теплої води. У табл. 1 наведено значення енергоспоживання бойлера $W_{B23} + W_{BD}$, загального споживання електроенергії W_{LC} , невикористаної енергії ФБ (або генерація енергії у мережу) W_g , споживання електроенергії з

мережі за добу), ступінь зниження витрат на електроенергію за однієї ставки тарифу оплати k_{E1} та для двох ставок тарифу k_{E2} (нічний тариф прийнято 0.5 від денного).

Таблиця 1

Результати моделювання										
γ , в.о.	$W_{B23}+W_{БД}$, Вт	W_{LC} , Вт	W_g , Вт	k_{E1} , в.о.	k_{E2} , в.о.	$W_{B23}+W_{БД}$, Вт	W_{LC} , Вт	W_g , Вт	k_{E1} , в.о.	k_{E2} , в.о.
З вирівнюванням графіку потужності						Без вирівнювання графіку потужності				
День літа з максимальною генерацією ФБ										
0	3802	17230	3171	4.71	4.94	3802	17230	3171	4.71	4.94
0.2	3802	19000	2033	7.576	8.19	3802	1900	2091	7.294	7.858
0.4	3802	20760	940	10.39	11.51	3.802	20760	1124	8.7	9.46
0.6	3771	22520	26.53	11.8	13.26	2997	22520	824.8	6.393	7.536
0.8	2678	24290	20.55	6.65	8.176	2251	24290	461.6	5.355	6.569
День літа з середньомісячною генерацією ФБ										
0	2225	17230	32.67	7.208	11.59	2225	17230	32.67	7.208	11.59
0.2	1056+380	19000	69.6	4.565	6.339	994+380	18990	102.7	4.475	6.205
0.4	0+380	20760	119	3.46	4.61	0+380	20760	119	3.46	4.61
0.6	0+380	22520	0	3.03	3.738	0+380	22520	0	3.03	3.738
0.8	0+380	24290	0	2.639	3.068	0+380	24290	0	2.639	3.068

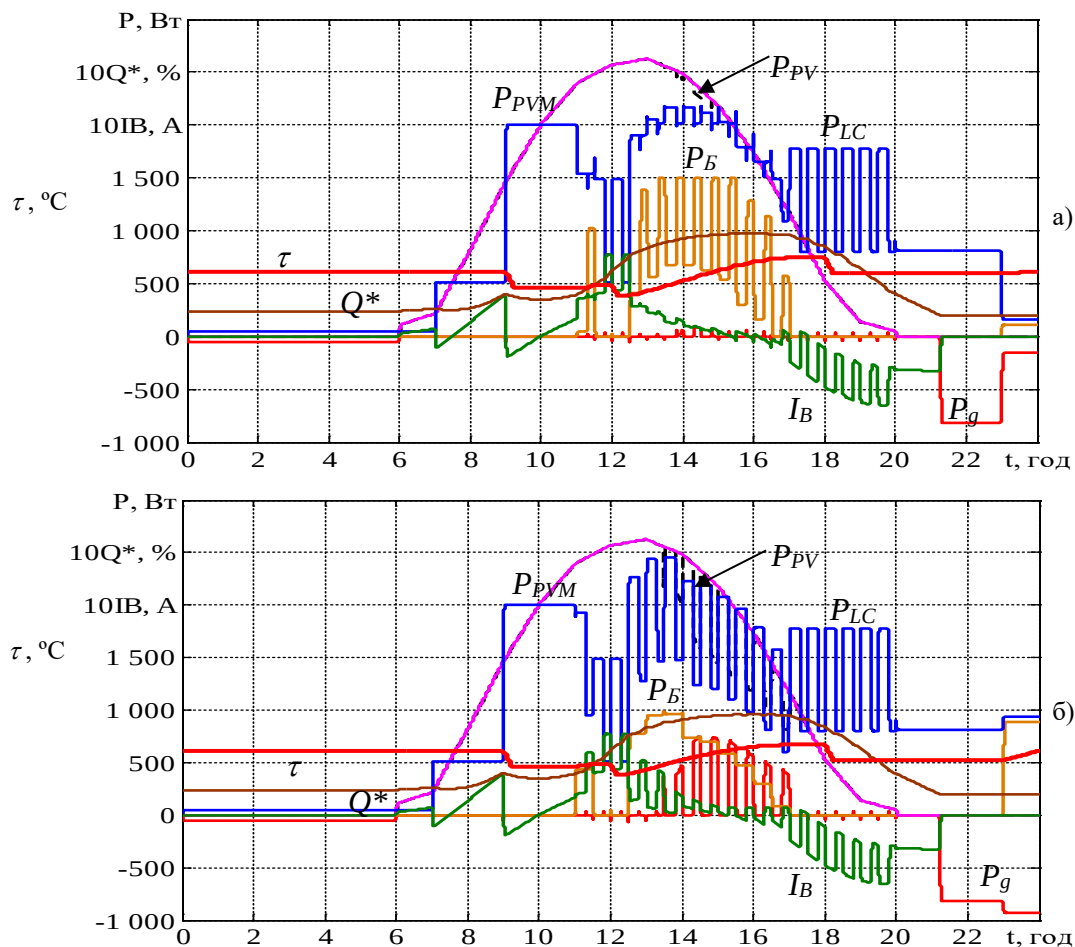


Рис. 3. Осцилограми процесів за максимальної потужності генерації ФБ:
а) з вирівнюванням потужності; б) без вирівнювання потужності

Осцилограми потужності ФБ в режимі максимальної потужності P_{PVM} і з врахуванням регулювання P_{PV} (виключення експорту енергії в мережу), потужності, що споживається з мережі P_g , потужності бойлера P_B , температури води в бойлері τ , стану заряду АКБ Q^* , загальної потужності споживання будинку P_{LC} для дня з максимальною генерацією наведені на рис. 3, а $\gamma = 0.6$ з вирівнюванням потужності та на рис. 3, б без вирівнювання потужності.

Зміну температурного режиму для літнього дня із середньою генерацією ФБ демонструє осцилограма на рис. 4, а при $\gamma = 0$ та дня з низькою генерацією ФБ на рис. 4, б.

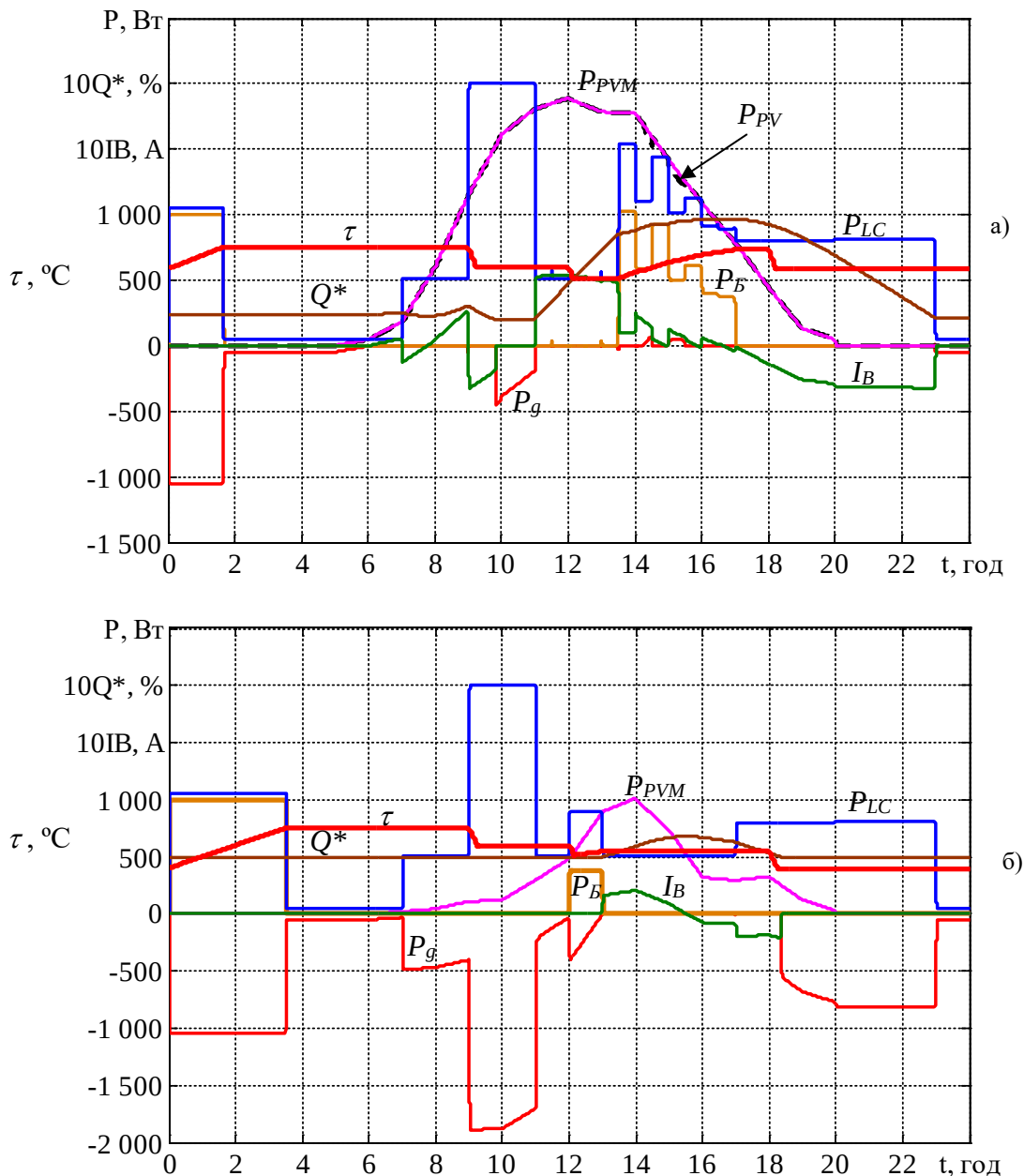


Рис. 4. Осцилограми процесів: а) за середньої потужності генерації ФБ;
б) за низької потужності генерації ФБ

Також розглянуто зміну енергоспоживання бойлера протягом дня у разі зміни $\gamma = 0.6 - 0.72$ (в межах 20%). При цьому для спрощення цикл роботи кондиціонера зберігався

постійним. При обраному за методикою [12] значенні $K = 220$ при максимальній генерації ФБ показники порівняно з постійним $\gamma = 0.6$ не погіршилися.

Висновки. Визначено доцільність врахування прогнозу температури повітря та потужності генерації ФБ. За цього в структуру блока управління введено wi-fi модуль зв'язку з веб-ресурсом та модуль розрахунку параметрів згідно прогнозу.

Алгоритм управління реалізується згідно температурі та розрахованому значенню надлишкової енергії ФБ на нагрівання води в бойлері та визначеному значенню додаткової енергії на нагрів. Це забезпечує завдання графіку температурного режиму для прийнятого графіку споживання теплої води.

Вирівнювання в часі графіку потужності споживання дозволяє підвищити ступінь використання енергії ФБ. За цього в разі максимальної генерації ФБ влітку витрати на споживання з мережі зменшуються від 1.038 до 1.848 разів. При $\gamma = 0.8$ досягається практично повне використання енергії ФБ. За середньої генерації влітку витрати на споживання з мережі зменшуються лише в 1.02 рази.

Подальший напрямок роботи пов'язано з удосконаленням реалізації отриманих рішень та експериментальними дослідженнями.

References

1. Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., Palm, J. (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*, Vol. 142, P. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
2. Luthander, R., Widén, J., Munkhammar, J., Lingfors, D. (2016). Self-consumption enhancement and peak shaving of residential photovoltaics using storage and curtailment. *Energy*, Vol. 112, P. 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.039>.
3. Abdalla, M. A. A., Min, W., Bing, W., Ishag, A. M., Saleh, B. (2023). Double-layer home energy management strategy for increasing pv self-consumption and cost reduction through appliances scheduling, ev, and storage. *Energy reports*, Vol. 10, P. 3494–3518. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.019>.
4. ABB solar inverters. Product manual react-3.6/4.6-tl (from 3.6 to 4.6 kw). URL: <https://solaren-power.com/pdf/manuals/abb-inverter-react-3.6tl-4.6tl-manual.pdf>
5. Growatt MIN 8200-11400 TL-XH-US PRO Datasheet. URL: https://us.growatt.com/upload/file/min_8200-11400tl-xh-us_pro_datasheet_en_202401.pdf.
6. Vanhoudt, D., Geysen, D., Claessens, B., Leemans, F., Jespers, L., van Bael, J. (2014). An actively controlled residential heat pump: Potential on peak shaving and maximization of self-consumption of renewable energy. *Renewable Energy*, Vol. 63, P. 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.021>.

Література

1. Luthander R., Widén J., Nilsson D., Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*, 2015. Vol. 142. P. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
2. Luthander R., Widén J., Munkhammar J., Lingfors D. Self-consumption enhancement and peak shaving of residential photovoltaics using storage and curtailment. *Energy*. 2016. Vol. 112. P. 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.039>.
3. Abdalla M. A. A., Min W., Bing W., Ishag A. M., Saleh B. Double-layer home energy management strategy for increasing pv self-consumption and cost reduction through appliances scheduling, ev, and storage. *Energy reports*. 2023. Vol. 10. P. 3494–3518. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.019>.
4. ABB solar inverters. Product manual react-3.6/4.6-tl (from 3.6 to 4.6 kw). URL: <https://solaren-power.com/pdf/manuals/abb-inverter-react-3.6tl-4.6tl-manual.pdf>.
5. Growatt MIN 8200-11400 TL-XH-US PRO Datasheet. URL: https://us.growatt.com/upload/file/min_8200-11400tl-xh-us_pro_datasheet_en_202401.pdf.
6. Vanhoudt D., Geysen D., Claessens B., Leemans F., Jespers L., van Bael J. An actively controlled residential heat pump: Potential on peak shaving and maximization of self-consumption of renewable energy. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 63. P. 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.021>.

7. Pontes Luz, G., Brito, M. C., Sousa, J. M. C., Vieira, S. M. (2021). Coordinating shiftable loads for collective photovoltaic self-consumption: a multi-agent approach. *Energy*, Vol. 229, Art. 120573. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120573>.

8. Casaleiro, Â., Figueiredo, R., Neves, D., Brito, M. C., Silva, C. S. (2017). Optimization of Photovoltaic Self-consumption using Domestic Hot Water Systems. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. November 2017. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0178>.

9. Al Mual, Z. A., Bany Issa, M. A., Sansó-Rubert Pascual, D., Bello Bugallo, P. M. (2023). Realistic home energy management system considering the life cycle of photovoltaic and energy storage systems. *Sustainability*, Vol. 15(14), Art. 11205. <https://doi.org/10.3390/su151411205>.

10. Finn, P., O'Connell, M., Fitzpatrick, C. (2013). Demand side management of a domestic dishwasher: Wind energy gains, financial savings and peak-time load reduction. *Applied Energy*, Vol. 101, P. 678–685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.004>.

11. Li, C., Kang, Z., Yu, H. et al. (2024). Research on Optimization Method of Home Energy Management System in Smart Grid. *J. Electr. Eng. Technol.*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42835-024-01807-w>.

12. Shavolkin, O. O., Pidhainyi, M. O. (2023). Vykorystannia boileru v systemi elektrozhyvlennia dlia zabezpechennia vlasnykh potreb pryvatnoi oseli z hibrydnoiu fotoelektrychnoiu systemoiu [Use of an electric boiler in the power supply system to provide the self-consumption of the residential house with a hybrid photovoltaic system]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, Vol. 5, No. 16, P. 60–75. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.5> [in Ukrainian].

13. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Kolcun, M., Medved', D. (2023). Improvement of a Hybrid Solar-Wind System for Self-Consumption of a Local Object with Control of the Power Consumed from the Grid. *Energies*, Vol. 15, No. 16, P. 5851. <https://doi.org/10.3390/en16155851>.

14. Solcast | Solar Api and Solar Weather Forecasting Tool. Solar API and Weather Forecasting Tool | Solcast™. URL: <https://solcast.com/>

15. Kohl K. Forecast.Solar. URL: <https://forecast.solar/>

7. Pontes Luz G., Brito M. C., Sousa J. M. C., Vieira S. M. Coordinating shiftable loads for collective photovoltaic self-consumption: a multi-agent approach. *Energy*. 2021. Vol. 229, Art. 120573. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120573>.

8. Casaleiro Â., Figueiredo R., Neves D., Brito M. C., Silva C. S. Optimization of Photovoltaic Self-consumption using Domestic Hot Water Systems. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. November 2017. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0178>.

9. Al Mual Z. A., Bany Issa M. A., Sansó-Rubert Pascual D., Bello Bugallo P. M. Realistic home energy management system considering the life cycle of photovoltaic and energy storage systems. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(14). Art. 11205. <https://doi.org/10.3390/su151411205>.

10. Finn P., O'Connell M., Fitzpatrick C. Demand side management of a domestic dishwasher: Wind energy gains, financial savings and peak-time load reduction. *Applied Energy*. 2013. Vol. 101. P. 678–685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.004>.

11. Li C., Kang Z., Yu H. et al. Research on Optimization Method of Home Energy Management System in Smart Grid. *J. Electr. Eng. Technol.* 2024. <https://doi.org/10.1007/s42835-024-01807-w>.

12. Шавьолкін О. О., Підгайний М. О. Використання бойлеру в системі електроживлення для забезпечення власних потреб приватної оселі з гібридною фотоелектричною системою. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 5 (16). С. 60–75. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.5>.

13. Shavolkin O., Shvedchykova I., Kolcun M., Medved' D. Improvement of a Hybrid Solar-Wind System for Self-Consumption of a Local Object with Control of the Power Consumed from the Grid. *Energies*. 2023. Vol. 15, No. 16. P. 5851. <https://doi.org/10.3390/en16155851>.

14. Solcast | Solar Api and Solar Weather Forecasting Tool. Solar API and Weather Forecasting Tool | Solcast™. URL: <https://solcast.com/>

15. Kohl K. Forecast.Solar. URL: <https://forecast.solar/>

16. 12.8V 150Ah Lithium Ion Phosphate Battery for RV, Solar, Marine, Home Storage. Junlee storage energy. URL: <https://www.junleepower.com/products/junlee-12v-150ah-lithium-ion-lifepo-phosphate-battery-with-bms-solar-deep-cycle-for-home-energy-storage>.

16. 12.8V 150Ah Lithium Ion Phosphate Battery for RV, Solar, Marine, Home Storage. Junlee storage energy. URL: <https://www.junleepower.com/products/junlee-12v-150ah-lithium-ion-lifepo-phosphate-battery-with-bms-solar-deep-cycle-for-home-energy-storage>.

SHAVOLKIN OLEXANDER

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3914-0812>
Researcher ID: T-2652-2018
E-mail: shavolkin@gmail.com

PIDHAINYI MYKOLA

PhD student, Department of Computer
Engineering and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4816-902X>
E-mail: pidhainyi.mykola@gmail.com

SHAVOLKIN O. O., PIDHAINYI M. O.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**IMPROVEMENT OF THE CONTROL SYSTEM OF A HYBRID PHOTOVOLTAIC
SYSTEM FOR SELF-CONSUMPTION OF A RESIDENTIAL BUILDING
WITH CONSUMPTION REGULATION**

Purpose. Improving the management of a hybrid photovoltaic system of a residential building with air conditioning and an adjustable electric boiler for heating water by increasing the degree of use of photovoltaic battery energy for consumption, developing the principles of implementing an energy management system using forecasting.

Methodology. Analysis of using possibilities an air conditioner at different air temperatures and photovoltaic battery generation using statistical data. Analysis of boiler temperature conditions, taking into account the energy consumption of the air conditioner and the nature of its power changes over time. Using computer modeling to evaluate results.

Results. The structure of the boiler power regulation block with consumption equalization in time and the algorithm for controlling the boiler temperature mode based on the photovoltaic battery generation forecast and the air temperature has been developed

Originality. A method for implementing boiler power regulation with leveling the graph of total power consumption over time has been developed. The principle of implementing an energy management system using air temperature forecast and photovoltaic battery generation to set boiler temperature conditions has been developed. This will help to increase the utilization of PV energy and reduce the consumption of electricity from the grid.

Practical value. The obtained solutions are the basis for the design of photovoltaic systems for self-consumption of private houses in the case of using an electric boiler in the providing warm water system and air conditioning.

Keywords: hybrid photovoltaic system; boiler power regulation; power equalization in time; management by forecast; energy processes modeling.

УДК 621.31:
378.147

ШВЕДЧИКОВА І. О., ПАНАСЮК І. В.,
ДЕМІШОНКОВА С. А., СТАЦЕНКО Д. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ З ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ В УМОВАХ ЗЕЛЕНОГО ПЕРЕХОДУ

Мета. Аналіз впливу технологічних змін, які відбуваються в умовах зеленого енергетичного переходу, на освітні програми підготовки фахівців з електричної інженерії в Київському національному університеті технологій та дизайну.

Методика. Аналіз основних тенденцій розвитку енергетики та електромеханіки в сучасних умовах. Аналіз особливостей освітніх програм спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та змісту освітніх компонент за рівнями освіти в контексті зеленого енергетичного переходу.

Результати. Розроблено пакети дисциплін вільного вибору здобувача для всіх рівнів вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з акцентом на здобутті теоретичних та практичних навичок, необхідних для майбутньої діяльності за фахом в умовах швидких змін. Вдосконалено цілі освітніх програм з врахуванням тенденцій зеленого переходу. Розроблено методичні рекомендації до виконання практичних (лабораторних) робіт з акцентом на дослідженні енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії та акумулюючих систем. Наведено приклад структури практичного завдання, присвяченого використанню некерованого випрямляча для вітрогенератора.

Наукова новизна. На базі імітаційного моделювання розроблено комплекс практичних робіт дослідницької спрямованості, які охоплюють розгляд комплексу питань, починаючи з генерування електроенергії відновлюваними джерелами (фотоелектричні батареї та вітрогенератори) до споживання.

Практична значимість. Розроблені в межах дисциплін вільного вибору та обов'язкових освітніх компонент практичні роботи призначені для використання під час проведення лабораторних та/або практичних занять зі здобувачами вищої освіти. Отримані під час таких занять знання та навички стануть основою для формування у здобувачів зеленого мислення, необхідного для повоєнної розбудови енергетичного сектору країни.

Ключові слова: фотоелектрична батарея; вітрогенератор; математична модель; акумуляторна батарея; управління електроспоживанням; інформаційно-комунікативні технології; зелений енергетичний перехід.

Вступ. В умовах суттєвих змін клімату на планеті, обумовлених викидами парникових газів, які утворюються від спалювання викопного палива, Європейським Союзом взятий амбітний курс на зелений перехід з кінцевою метою досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року та із заміною викопного палива на відновлювані джерела енергії (ВДЕ) до 2035 року [1]. На сьогодні майже всі країни світу стикаються з проблемою забезпечення сталого постачання енергії через сильну кореляцію між споживанням енергії та зростанням економіки [2]. Зелений перехід для України в сучасних умовах означає розвиток відновлюваної енергетики, децентралізованих систем електропостачання та перехід до моделей циклічної економіки.

В аналітичній довідці Європейського фонду освіти (ЄФО) «Skilling for the green transition» [3] відмічається, що «... зелений перехід вимагає оволодіння особливим набором умінь та навичок, які люди повинні отримати в процесі навчання на всіх рівнях освіти». Для подальшого просування зеленого переходу стає важливим «...навчання впродовж усього життя та навчання шириною в життя» [2]. Все це потребує системних змін як в освіті в цілому, так й в підготовці фахівців з електричної інженерії, вміння та навички яких мають відповідати сучасним тенденціям зеленого енергетичного переходу.

Аналіз попередніх досліджень. Існуючі публікації за проблематикою дослідження можна умовно поділити на дві групи: перша група включає публікації, в яких висвітлюється роль освіти у формуванні «зеленого» світогляду студентів, аналізуються результати їх навчання у цьому напрямку. В публікаціях другої групи досліджуються фактори «зеленого переходу», що впливають на різні аспекти освітньої діяльності.

До публікацій першої групи можуть бути віднесені роботи [4–9]. Так, в [4] акцентовано увагу на тому, що майбутні фахівці в сфері електричної інженерії в процесі навчання повинні дійти висновку, що експлуатація невідновлюваних природних ресурсів повинна поступово замінюватися використанням відновлюваних та формуванням «зелених» виробництв. В [5] наголошується, що не тільки навчання, але й розповсюдження знань з енергетичного переходу є важливою частиною інновацій в освіті. В роботі [6] відзначається, що «...впровадження сучасних професійних кваліфікацій для сталого розвитку зеленої економіки є важливим для розвитку ринку праці, створення нових робочих місць, вдосконалення системи неперервної професійної освіти, формування висококваліфікованих фахівців у галузі відновлювальних джерел енергії». Необхідність формування екологічної компетентності у майбутніх фахівців-електромеханіків в умовах швидких змін показана в [7]. Виявлено, що ця компетентність має кілька взаємозалежних компонентів: ціннісно-мотиваційний (цінності та мотивації, що впливають на здобуття екологічних знань), когнітивний (знання та розуміння екологічних процесів) та операційний (практичні навички для вирішення екологічних проблем).

В роботі [8] проведено дослідження щодо впливу навчання з питань «зеленої енергії» на групу студентів шляхом порівняння їхніх знань до та після вивчення курсу, а також оцінювання їх результативності методами математичної статистики. Встановлено, що ймовірнісний показник (Р-значення) по відношенню до «зеленої енергії» не завжди досягає рівня значущості в цьому дослідженні. Це свідчить про те, що ще існує проблема усвідомлення студентами важливості та практичності «зеленої енергії» в сучасних умовах.

В [9] досліджено роль освіти на екологічну стійкість регіонів в умовах «зеленої трансформації» економіки на прикладі Китаю. Результати дослідження виявили значний вплив освіти на скорочення викидів забруднюючих речовин. Встановлений більш виражений ефект освіти та державного втручання на екологічну поведінку людей у східних провінціях, де зосереджений більш потужний промисловий та освітній потенціал.

Таким чином, можна констатувати, що освіта дійсно відіграє значну роль у формуванні «зеленого» світогляду студентів. У той самий час для більш глибокого усвідомлення ними важливості проблеми зеленого переходу мають бути задіяні додаткові більш сучасні важелі впливу на освітню діяльність, пов'язані з розвитком сучасних технологій.

Як зазначено в [10], такі технологічні новації, як розумні електромережі, розподілені енергетичні ресурси, включаючи відновлювані джерела енергії, зокрема сонячні та вітрові електростанції, впливають на зміст освітньої діяльності майбутніх фахівців з електричної інженерії. Сучасна цифрова енергетика базується на використанні інформаційно-комунікаційних технологій, які охоплюють волоконну оптику, високошвидкісний інтернет (DSL), мобільні технології (3G, 4G, 5G). Технології блокчейну та штучного інтелекту також опановують енергетичний сектор [10]. Тому інформаційно-комунікаційні технології можна вважати одним з найважливіших факторів зеленого переходу, що впливає на освітню діяльність.

Вплив технологічних змін знаходить відображення в освітній діяльності університетів в таких напрямках [11]: розробка та модернізація освітніх програм з акцентом на сучасні екологічні потреби, потреби промисловості та регіону; оновлення навчальних курсів; впровадження нових активних студентоцентризованих методик викладання; оновлення лабораторної бази, відкриття нових сучасних лабораторій тощо. Прикладом оновлення підходів до проведення лабораторних робіт є використання так званих «Pop-Up Learning Lab»

як «...унікального освітнього середовища для розвитку наукових та дослідницьких компетенцій майбутніх фахівців в сфері енергетики...» [12]. Нові активні студентоцентровані методики викладання у галузі електричної інженерії [13] базуються на використанні проєктного підходу, який «...розглядається як спосіб досягнення цілей у вигляді практико-орієнтованих результатів, отриманих з використанням традиційних та інноваційних знань» [13].

Таким чином, аналіз існуючих публікацій показав тісний взаємообумовлений зв'язок між інноваціями зеленого переходу та освітньою діяльністю, а також необхідність формування на постійній основі у майбутніх фахівців навичок «зеленого мислення». У той самий час питання особливості підготовки фахівців в галузі електричної інженерії в умовах зеленого енергетичного переходу потребують подальшого вивчення та узагальнення.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз впливу технологічних змін, які відбуваються в умовах зеленого енергетичного переходу, на освітні програми підготовки фахівців з електричної інженерії.

Результати дослідження. Особливості підготовки майбутніх фахівців з електричної інженерії в умовах зеленого переходу будемо розглядати на прикладі освітніх програм, розроблених у Київському національному університеті технологій та дизайну (КНУТД) на кафедрі комп'ютерної інженерії та електромеханіки. В КНУТД впроваджені освітні програми (ОП) з електричної інженерії (спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка») на всіх трьох рівнях вищої освіти: бакалаврському, магістерському та освітньо-науковому. Особливості цих ОП наведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Особливості освітніх програм зі спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

Рівень/ступінь вищої освіти	Назва ОП	Особливість
Перший (бакалаврський)/ Бакалавр	Електромеханіка	Розвиває теоретичну та практичну підготовку в області проектування, створення та обслуговування електромеханічних пристроїв і систем, а також впровадження інноваційних технологій електроенергетики, електротехніки та електромеханіки в побутовій сфері
Другий (магістерський)/ Магістр	Електропобутова техніка	Розвиває теоретичну та практичну підготовку в області проектування, створення та обслуговування електропобутової техніки, а також впровадження інноваційних інформаційних технологій в побутовій сфері.
Третій (освітньо-науковий)/ Доктор філософії	Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка	Орієнтована на сферу енергетики з відновлювальними джерелами і енергозбереження в енергетиці, електротехнологіях і електромеханіці.

ОП «Електромеханіка» та «Електропобутова техніка» розроблені з урахуванням багаторічного досвіду підготовки бакалаврів та магістрів за відповідними напрямками, тому їх можна віднести до класичних. Орієнтація цих програм на розвиток теоретичної та практичної підготовки з впровадження сучасних інноваційних технологій електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (ОП «Електромеханіка») та інноваційних інформаційних технологій (ОП «Електропобутова техніка») робить їх актуальними в контексті зеленого переходу. ОП підготовки докторів філософії, яка розроблена та впроваджена нещодавно,

безпосередньо орієнтована на сферу зеленої енергетики. В свою чергу, в розрізі кожної з програм передбачені освітні компоненти (ОК), які формують загальні (ЗК) та/або фахові (ФК) компетентності та програмні результати навчання (ПРН), необхідні для зеленого енергетичного переходу. В табл. 2 така інформація узагальнена щодо обов'язкових ОК [14].

Таблиця 2

Освітні компоненти в контексті зеленого переходу

Назва ОП / рівень вищої освіти	Освітні компоненти (обов'язкові)	Фахові компетентності	Програмні результати навчання
Електромеханіка/ перший (бакалаврський)	ОК 18. Електричні системи та мережі. ОК 21. Комп'ютерні технології проєктування. ОК 23 Інноваційні технології електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. ОК 24 Комп'ютерні системи керування.	ФК 9. Усвідомлення необхідності підвищення ефективності електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного устаткування. ФК 10 Усвідомлення необхідності постійно розширювати власні знання про нові технології в електроенергетиці, електротехніці та електромеханіці.	ПРН 4. Знати принципи роботи біоенергетичних, вітроенергетичних, гідроенергетичних та сонячних енергетичних установок. ПРН 8. Розуміти значення традиційної та відновлюваної енергетики для успішного економічного розвитку. ПРН 18. Вміти застосовувати інноваційні технології електроенергетики, електротехніки, електромеханіки.
Електропобутова техніка/другий (магістерський)	ОК 4. Інформаційні технології розумного будинку.	ЗК 3. Здатність до використання інформаційних і комунікаційних технологій.	ПРН 13. Планувати та виконувати наукові дослідження та інноваційні проєкти в сфері електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, включаючи електропобутову техніку.
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/третій (освітньо-науковий)	ОК 3. Інформаційно-комунікаційні технології в наукових дослідженнях. ОК 7. Електротехнічні комплекси та системи. ОК 8. Системи керування та автоматичного регулювання.	ЗК 6. Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології. ФК 6. Здатність застосовувати вміння аналітичної експериментальної та асоціативної творчої роботи в генеруванні принципово нових проєктних ідей і технологій у галузі електричної інженерії, у тому числі ресурсозберігаючих та екологічно безпечних.	ПРН 2. Знати принципи реалізації сучасних структур відновлювальної енергетики та засоби досягнення енергозбереження в електроенергетиці, електротехніці та електромеханіці. ПРН 5. Застосовувати сучасні цифрові інформаційні системи та системи керування.

Вплив тенденцій зеленого переходу є найбільш вираженим для дисциплін вільного вибору здобувача, які обираються для «...поглиблення професійних знань в межах обраної освітньої програми та здобуття додаткових професійних компетентностей; поглиблення своїх знань та здобуття додаткових загальних і професійних компетентностей в межах спеціальності або споріднених спеціальностей і галузі знань; ознайомлення з сучасним рівнем наукових досліджень інших галузей знань та розширення або поглиблення результатів навчання за загальними компетентностями» [15].

До загальноуніверситетського каталогу дисциплін вільного вибору внесені, зокрема, такі дисципліни: «Енергозбереження та енергетичний менеджмент» – викладається на першому та другому рівнях вищої освіти [16], «Smart-системи електроспоживання та розподіленої генерації», «Відновлювані джерела енергії», «Комбіновані системи електроживлення та забезпечення якості електроенергії» – пропонуються на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти [16].

Зміст дисципліни «Енергозбереження та енергетичний менеджмент» включає тему «Використання вторинних енергетичних ресурсів та нетрадиційних джерел енергії». Зміст дисциплін вільного вибору для освітньо-наукового рівня вищої освіти повністю відповідає тенденціям зеленого переходу та складається з наступних тем:

- дисципліна «Відновлювані джерела енергії»: Тема 1. Загальні положення. Тема 2. Силкові перетворювальні пристрої в системах з поновлювальними джерелами електроенергії. Тема 3. Сонячна енергетика. Тема 4. Сонячна теплоенергетика. Тема 5. Вітроенергетика. Тема 6. Мала гідроенергетика. Тема 7. Енергетика довкілля;

- дисципліна «Комбіновані системи електроживлення та забезпечення якості електроенергії»: Тема 1. Об'єкти комбінованих систем електроживлення. Тема 2. Види та особливості відновлювальних та традиційних джерел електроенергії. Тема 3. Параметри, що визначають якість електроенергії згідно стандартам. Тема 4. Перетворювальні агрегати відновлювальних джерел енергії. Тема 5. Комбіновані системи електроживлення з накопичувачами енергії. Тема 6. Забезпечення ефективності комбінованих систем електроживлення;

- дисципліна «Smart-системи електроспоживання та розподіленої генерації»: Тема 1. Розподілена генерація та її функціональні особливості. Тема 2. Елементи систем розподіленої генерації. Тема 3. Побудова систем розподіленої генерації. Тема 4. Застосування smart-систем електроспоживання.

Тематика практичних занять дисциплін вільного вибору охоплює широке коло питань та підібрана таким чином, щоб набути навички, як проведення аналітичних розрахунків, так й моделювання в програмах MATLAB, Electronics Workbench. Так, тематика практичних завдань з дисципліни «Відновлювані джерела енергії» охоплює, зокрема, такі питання: розрахунок і дослідження некерованого випрямляча для вітрогенератору; дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги та автономного інвертора; розрахунок акумуляторної батареї; визначення технічних характеристик сонячної панелі; розрахунок сонячної батареї заданої потужності; вивчення принципів регулювання потужності сонячної батареї; вивчення структури сонячної електростанції великої потужності; вивчення структури автономної сонячної електростанції малої потужності; вивчення структури комбінованої системи електропостачання; вивчення характеристик вітрогенератору; вивчення структури вітрогенераторної установки великої потужності; вивчення структури автономної вітроелектростанції малої потужності; вивчення структури гідроелектростанції.

Як приклад, можна навести особливості виконання практичного завдання за темою «Розрахунок і дослідження некерованого випрямляча для вітрогенератору» з дисципліни «Відновлювані джерела енергії».

На першому етапі здобувачі ознайомлюються з розрахунковою схемою трифазного некерованого випрямляча, який використовується на виході вітрогенератору та побудований на діодах (VD1-VD6) за мостовою схемою з вихідним ємнісним фільтром C . Схема наведена на рис. 1 і містить трифазний генератор з ЕРС (E_A, E_B, E_C) і індуктивним опором вихідних фаз X_S . Далі здобувачі за вихідними даними, які надаються викладачем, здійснює розрахунок вихідного струму I_d та напруги U_d випрямляча, а також ємності C фільтру.

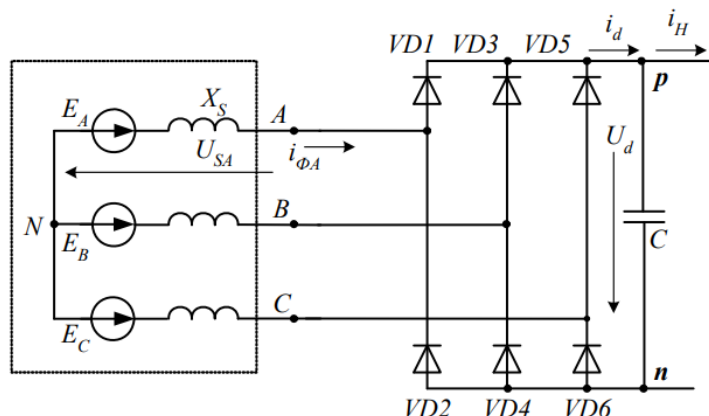


Рис. 1. Розрахункова схема випрямляча

На другому етапі здобувачами здійснюється дослідження некерованого випрямляча в програмі MATLAB з використанням шаблону моделі з розрахованими параметрами. Використовується модель спрощеної вітрогенераторної установки (рис. 2), яка містить вітротурбіну ВТ, блок завдання швидкості вітру ЗШВ, синхронний генератор СГ з постійними магнітами, випрямляч, регулятор потужності РП, імпульсний перетворювач напруги ІП, навантаження (джерело ЕРС постійного струму). Модель ВТ наведена на рис. 3 [18].

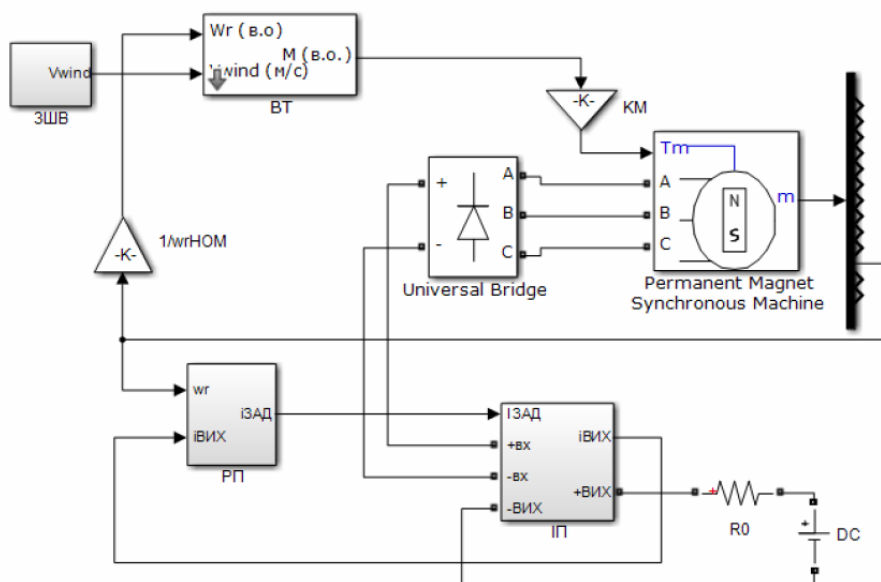


Рис. 2. Структура моделі вітрогенераторної установки

В якості моделі СГ використано стандартну модель з бібліотеки MATLAB. Вихідна напруга СГ випрямляється некерованим випрямлячем і подається на вхід імпульсного перетворювача напруги постійного струму (ІП). Оскільки швидкість обертання СГ змінюється у широких межах, таким же чином змінюється і вихідна напруга генератора. У разі

використання акумуляторної батареї (АКБ) вихідна напруга повинна підтримуватися постійною у певних межах (напруга визначається ступенем заряду АКБ), тому доречним є використання універсального ПІ, що підвищує або знижує вихідну напругу. На рис. 4 наведені осцилограми струму i_d і напруги u_d на виході випрямляча, вихідного струму установки i_B і вихідної потужності P_E .

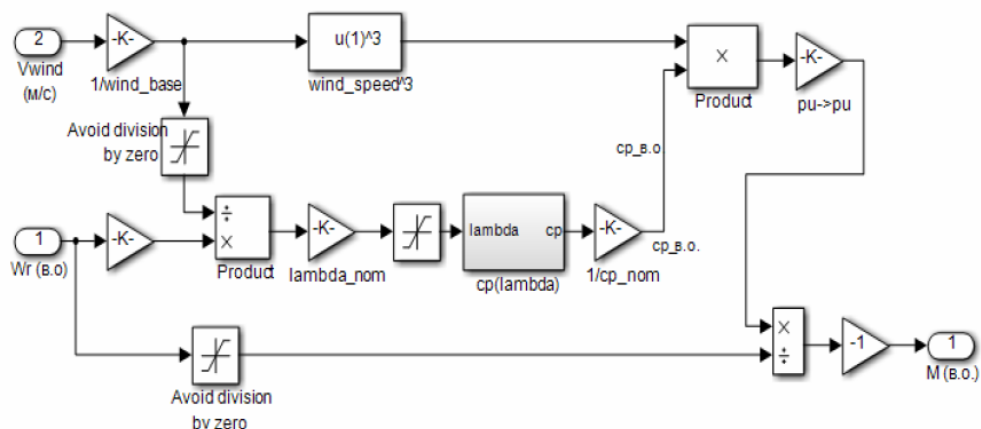


Рис. 3. Модель вітротурбіни ВТ

За результатами виконання першого та другого етапів роботи здобувачі мають здійснити порівняння отриманих при моделюванні характеристик з даними розрахунку. Також здобувачам пропонується надати письмові відповіді на питання, наприклад, такі, що стосуються знання основних показників схем випрямлячів, можливостей покращення якості вихідної напруги випрямляча, розуміння факторів, від яких залежить коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги.

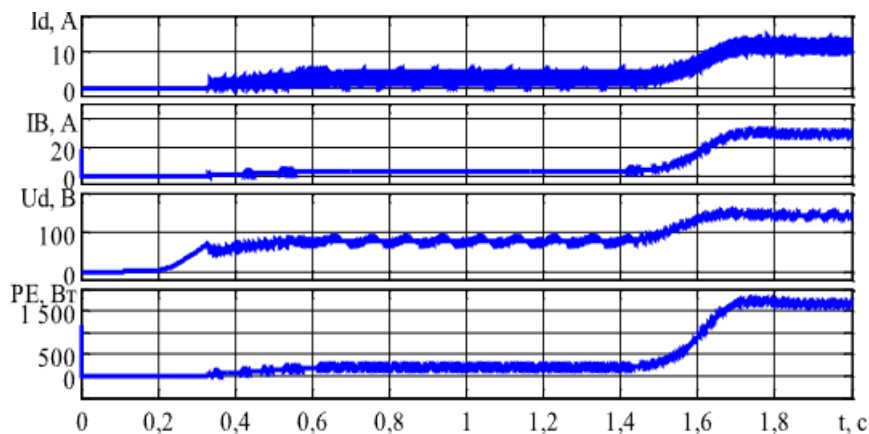


Рис. 4. Осцилограми, що характеризують роботу вітрогенераторної установки

Таким чином, під час виконання завдань дослідницької спрямованості студенти здобувають як навички проведення розрахунків, так й здійснення імітаційного моделювання з використанням сучасного програмного продукту; знайомляться з характеристиками сучасного обладнання.

Висновки. Аналіз ОП зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», впроваджених в КНУТД, показав, що особливості цих програм спрямовані на розвиток теоретичної та практичної підготовки здобувачів з врахуванням тенденцій зеленого переходу. Встановлено, що вплив зелених змін в енергетиці є найбільш вираженим для дисциплін вільного вибору здобувача. Це обумовило необхідність розробки для

вибіркових дисциплін практичних робіт дослідницької спрямованості, тематика яких охоплює широке коло питань, пов'язаних з відновлюваною енергетикою, та передбачає набуття як навичок проведення аналітичних розрахунків, так й навичок моделювання процесів за допомогою програмних продуктів.

Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні ефективності впровадження «зелених» вибіркових дисциплін та їх впливу на розвиток «зеленого» мислення у здобувачів вищої освіти.

References

Література

1. Kytsyuk, I., Naumenko, N., Prysyazhnyuk V. (2023). Yevropeyskyy zelenyy kurs: mozhlyvosti ta naslidky dlya ukrayinskoho biznesu [The European Green Course: opportunities and consequences for Ukrainian business]. *Ekonomika ta suspilstvo = Economics and Society*, Vol. 56. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-87> [in Ukrainian].
2. Aktar, M. A., Harun, M. B., Alam, M. M. (2020). Green Energy and Sustainable Development. In: Leal Filho, W., Azul, A., Brandli, L., Lange Salvia, A., Wall, T. (eds). *Affordable and Clean Energy*. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71057-0_47-1.
3. Melnyk, L. G., Degtyareva, I. B., Zavadovyyeva, Y. N. (2017). "Zelena" ekonomika ta tretya promyslova revolyutsiya v universytet-skiy osviti ["Green" economy and the third industrial revolution in university education]. *Proceedings of the All-Ukrainian scientific and methodological conference: Suchasnyy stan ta problemy vyshchoyi ekolohichnoyi osvity = Current state and problems of higher environmental education*, Odesa, P. 102–104 [in Ukrainian].
4. Skilling for the green transition. URL: https://www.etf.europa.eu/sites/default/files/2022-11/Edited%20green%20transition%20policy%20brief_EN.pdf?
5. Medved, P., Golob, U., Kamin, T. (2023). Learning and diffusion of knowledge in clean energy communities. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 46, Art. 100701. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2023.100701>.
6. Radkevich, V. O., Kravets, S. G., Saliy, I. V., Radkevich, O. P. (2023). Suchasni profesijni kvalifikatsiyi dlya staloho rozvytku zelenoyi ekonomiky [Modern professional qualifications for the sustainable development of the green economy]. *Ekolohichni nauky = Environmental sciences*, Vol. 6 (51), P. 224–230. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.37> [in Ukrainian].
7. Soloshych, I., Shvedchykova, I., Grynyov, R., Kononets, N., Bunetska, I. (2021). Model of Formation of Ecological Competence of Future Engineers-Electromechanics. 2021
1. Кицюк І., Науменко Н., Присяжнюк В. Європейський зелений курс: можливості та наслідки для українського бізнесу. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 56. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-87>.
2. Aktar M. A., Harun M. B., Alam M. M. Green Energy and Sustainable Development. In: Leal Filho W., Azul A., Brandli L., Lange Salvia A., Wall T. (eds). *Affordable and Clean Energy*. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71057-0_47-1.
3. Мельник Л. Г., Дегтярьова І. Б., Завдовська Ю. Н. "Зелена" економіка та третя промислова революція в університетській освіті. *Сучасний стан та проблеми вищої екологічної освіти: матеріали Всеукраїнської науково-методичної конф.* (м. Одеса, 2017 р.). Одеса, 2017. С. 102–104.
4. Skilling for the green transition. URL: https://www.etf.europa.eu/sites/default/files/2022-11/Edited%20green%20transition%20policy%20brief_EN.pdf?
5. Medved P., Golob U., Kamin T. Learning and diffusion of knowledge in clean energy communities. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2023. Vol. 46. Art. 100701. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2023.100701>.
6. Радкевич В. О., Кравець С. Г., Салій І. В., Радкевич О. П. Сучасні професійні кваліфікації для сталого розвитку зеленої економіки. *Екологічні науки*. 2023. № 6 (51). С. 224–230. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.37>.
7. Soloshych I., Shvedchykova I., Grynyov R., Kononets N., Bunetska I. Model of Formation of Ecological Competence of Future Engineers-

IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenichuk, Ukraine, P. 1–5. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598792.

8. Chen, K. H.-C. et al. (2020). The Effects of Green Energy Education on Students' Learning. In: Shen, J., Chang, Y. C., Su, Y. S., Ogata, H. (eds). *Cognitive Cities. IC3 2019. Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1227. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6113-9_83.

9. Li, X., Ma, L., Khan, S., Zhao, X. (2023). The Role of Education and Green Innovation in Green Transition: Advancing the United Nations Agenda on Sustainable Development. *Sustainability*, Vol. 15, Art. 12410. URL: <https://doi.org/10.3390/su151612410>.

10. Zajc, M. (2022). Information Communication Technologies as Enabler of Green Transition: Education and Research Perspectives. *2022 30th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia. DOI: 10.1109/TELFOR56187.2022.9983739.

11. Zajc, M., Mujčić, A., Tonello, A., Delić, V., Koprivica, M., Drlje, S. R. ... & Suljanović, N. (2020). ICT engineering study programs to meet modern society needs: Erasmus+ project BENEFIT. *ERK 2020*. P. 393–396. URL: <https://erk.fe.uni-lj.si/2020/ERK20.pdf>.

12. Shvedchykova, I., Burger, W., Panasiuk, I., Soloshych, I., Grynova, M. (2022). Application of Pop-Up Learning Laboratories in Electrical Engineering Distance Education. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenichuk, Ukraine. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005771>.

13. Shvedchykova, I. O., Soloshych, I. O., Soloshych, S. (2021). Naukova proyektna diyalnist yak peredumova formuvannya fakhovykh kompetentnostey здобувачів вищої освіти з електричної інженерії [Scientific project activity as a prerequisite for the formation of professional competences of students of higher education in electrical engineering]. *Tekhnolohiyi ta inzhynirynh = Technologies and engineering*, No. 3, P. 39–48. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.4> [in Ukrainian].

14. Instytut inzheneriyi ta informatsiynykh tekhnolohiy. Forma nadannya propozyitsiy shchodo udoskonalennya osvitnikh proham [Institute of Engineering and Information Technologies. The form for submitting proposals for the improvement of educational programs]. URL: <https://knutd.edu.ua/ekts/2023/op-iiit/> [in Ukrainian].

Electromechanics. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenichuk, Ukraine, 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598792.

8. Chen K. H.-C. et al. The Effects of Green Energy Education on Students' Learning. In: Shen J., Chang Y. C., Su Y. S., Ogata H. (eds). *Cognitive Cities. IC3 2019. Communications in Computer and Information Science*. 2020. Vol. 1227. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6113-9_83.

9. Li X., Ma L., Khan S., Zhao X. The Role of Education and Green Innovation in Green Transition: Advancing the United Nations Agenda on Sustainable Development. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Art. 12410. <https://doi.org/10.3390/su151612410>.

10. Zajc M. Information Communication Technologies as Enabler of Green Transition: Education and Research Perspectives. *2022 30th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, 2022. DOI: 10.1109/TELFOR56187.2022.9983739.

11. Zajc M., Mujčić A., Tonello A., Delić V., Koprivica M., Drlje, S. R. ... & Suljanović N. ICT engineering study programs to meet modern society needs: Erasmus+ project BENEFIT. *ERK 2020*. P. 393–396. URL: <https://erk.fe.uni-lj.si/2020/ERK20.pdf>.

12. Shvedchykova I., Burger W., Panasiuk I., Soloshych I., Grynova M. Application of Pop-Up Learning Laboratories in Electrical Engineering Distance Education. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenichuk, Ukraine, 2022. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005771>.

13. Шведчикова І. О., Солошич І. О., Солошич С. Наукова проєктна діяльність як передумова формування фахових компетентностей здобувачів вищої освіти з електричної інженерії. *Технології та інжиніринг*. 2021. № 3. С. 39–48. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.4>.

14. Інститут інженерії та інформаційних технологій. Форма надання пропозицій щодо удосконалення освітніх програм. URL: <https://knutd.edu.ua/ekts/2023/op-iiit/>

15. Polozhennya pro realizatsiyu prava na vilnyy vybir navchalnykh dystsyplin здобувачами вищої освіти у Київському національному університеті технологій та дизайну [Regulations on the exercise of the right to free choice of academic disciplines by students of higher education at the Kyiv National University of Technologies and Design]. URL: https://www.knutd.edu.ua/files/dostupdopi/Polozhennya/Polozhennya_pro_vilnij_vibir_2022.pdf [in Ukrainian].

16. Zahalnouniversytet-skyy katalog dystsyplin vilnoho vyboru здобувача вищої освіти 2023–2024 н.р. [University-wide catalog of subjects of free choice for higher education applicants 2023–2024]. URL: <https://knutd.edu.ua/ekts/dvvs/dvvs-23-24/> [in Ukrainian].

17. Katalog dystsyplin vilnoho vyboru здобувача освітнього ступеня "доктор філософії" на 2023/2024 н.р. [Catalog of subjects of free choice for the holder of the educational degree "Doctor of Philosophy" for 2023/2024]. URL: <https://knutd.edu.ua/ekts/dvvs-asp/dvvs-df-22-23/> [in Ukrainian].

18. Shavolkin, O. O. (2019). Peretvoryuvalni ahrehaty dlya kombinovanykh system elektrozhyvlennya lokalnykh ob'ektiv z ponovlyuvalnymy dzherelamy elektroenerhiyi [Conversion units for combined power supply systems of local facilities with renewable sources of electricity]. Kyiv: KNUTD. 159 p. [in Ukrainian].

15. Положення про реалізацію права на вільний вибір навчальних дисциплін здобувачами вищої освіти у Київському національному університеті технологій та дизайну. URL: https://www.knutd.edu.ua/files/dostupdopi/Polozhennya/Polozhennya_pro_vilnij_vibir_2022.pdf

16. Загальноуніверситетський каталог дисциплін вільного вибору здобувача вищої освіти 2023–2024 н.р. URL: <https://knutd.edu.ua/ekts/dvvs/dvvs-23-24/>

17. Каталог дисциплін вільного вибору здобувача освітнього ступеня "доктор філософії" на 2023/2024 н.р. URL: <https://knutd.edu.ua/ekts/dvvs-asp/dvvs-df-22-23/>

18. Шавьолкін О. О. Перетворювальні агрегати для комбінованих систем електроживлення локальних об'єктів з поновлювальними джерелами електроенергії: монографія. Київ: КНУТД, 2019. 159 с.

SHVEDCHYKOVA IRYNA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3005-7385>
Scopus ID: 6503887672
Researcher ID: O-2765-2018
E-mail: shvedchykova.io@knutd.edu.ua

PANASIUK IHOR

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>
Scopus ID: 57219251131
Researcher ID: D-4255-2017
E-mail: panasjuk@knutd.edu.ua

DEMISHONKOVA SVITLANA

Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-56788114>
Scopus ID: 57219315080
E-mail: demishonkova.sa@knutd.edu.ua

DMYTRO STATSENKO

Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3064-3109>
Scopus ID: 57210341005
Researcher ID: C-3644-2017
E-mail: statsenko.dv@knutd.com.ua

SHVEDCHYKOVA I. O., PANASIUK I. V., DEMISHONKOVA S. A., STATSENKO D. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

FEATURES OF THE TRAINING OF FUTURE SPECIALISTS IN ELECTRICAL ENGINEERING IN THE CONDITIONS OF THE GREEN TRANSITION

Purpose. Analysis of the impact of technological changes occurring in the conditions of the green energy transition on the educational programs of training specialists in electrical engineering at the Kyiv National University of Technologies and Design.

Methodology. Analysis of the main trends in the development of energy and electromechanics in modern conditions. Analysis of the features of the educational programs of the speciality 141 "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics" and the content of educational components by education levels in the context of the green energy transition.

Findings. Packages of disciplines of the student's free choice have been developed for all levels of higher education in the speciality 141 "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics" with an emphasis on acquiring theoretical and practical skills necessary for future work in the profession in conditions of rapid changes. The goals of educational programs have been improved, taking into account the trends of the green transition. Methodological recommendations for the performance of practical (laboratory) work with an emphasis on the study of energy systems based on renewable energy sources and energy storage systems have been developed. An example of the structure of a practical work devoted to the use of an uncontrolled rectifier for a wind generator is provided.

Originality. Based on simulation modeling, a complex of research-oriented practical works has been developed, which cover the consideration of a complex of issues, starting from the generation of electricity by renewable energy sources (photoelectric batteries and wind generators) to consumption.

Practical value. Practical works developed within the disciplines of free choice and mandatory educational components are intended for use during laboratory and/or practical classes with students of higher education. The knowledge and skills acquired during such classes will become the basis for the formation of green thinking among the students, necessary for the post-war development of the country's energy sector.

Keywords: photovoltaic battery; wind generator; mathematical model; storage battery; power consumption management; information and communication technologies; green energy transition.

УДК 677.072:
677.494:677.01

ДМИТРИК О. М., ГАЛАВСЬКА Л. Є.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ВПЛИВ ТИПУ ПЛОСКОВ'ЯЗАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА РОЗРИВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИКОТАЖНОГО МАТЕРІАЛУ З ВИСОКОМІЦНИХ НИТОК

Мета. Дослідження впливу зміни типу плосков'язального обладнання (без платин та з платинами) на характеристики міцності трикотажного матеріалу переплетення кулірна гладь, виготовленого з високомолекулярних поліетиленових та пара-арамідних ниток.

Методика. Робота базується на теорії в'язання, методах аналізу та синтезу отриманих результатів, використанні основ текстильного матеріалознавства. Характеристики стійкості розроблених зразків трикотажних матеріалів до дії розривального зусилля встановлено у відповідності до існуючої стандартизованої методики з використанням розривної машини електронного типу КТ-7010AZ. Для виявлення впливу щільності в'язання на величину розривального навантаження та видовження досліджуваних зразків трикотажних матеріалів реалізовано метод лінійного регресійного аналізу при традиційному плануванні активного експерименту. Для обробки результатів експерименту та побудови графіків за середніми значеннями показників використано програму Microsoft Excel.

Результати. У ході проведених досліджень виявлено, що на розривальні характеристики трикотажного матеріалу, виробленого з високомолекулярних поліетиленових та пара-арамідних ниток впливає тип плосков'язального обладнання, а саме: наявність чи відсутність платин при формуванні петель. Участь платин у процесі петлетворення обумовлює формування заданої величини відрізка нитки в області платинної дуги петлі. Це у свою чергу впливає на величину розривального видовження трикотажного матеріалу. Зразки трикотажного матеріалу з високомолекулярних поліетиленових ниток продемонстрували кращі результати щодо стійкості до прикладеного розривального зусилля як у напрямку петельних рядів, так і стовпчиків. На величину питомого розривального видовження на один петельний стовпчик чи ряд у випадку вироблення трикотажного матеріалу на плосков'язальному обладнанні без платин із загальним зусиллям відтягування полотна, зміна щільності в'язання має незначний вплив (до 5%).

Наукова новизна. Встановлено характер впливу типу плосков'язального обладнання (з платинами та без) та щільності в'язання на характеристики міцності трикотажного матеріалу переплетення гладь, виробленого з високомолекулярних поліетиленових та пара-арамідних ниток.

Практична значимість. Одержані у ході експерименту регресійні залежності дозволяють визначити величину розривального навантаження та видовження трикотажного матеріалу переплетення гладь, виробленого з високомолекулярних поліетиленових та пара-арамідних ниток, у відповідності до обраного типу плосков'язального обладнання та величини глибини кулірування.

Ключові слова: пара-арамідна нитка; високомолекулярна поліетиленова нитка; високоміцний трикотажний матеріал; переплетення гладь; розривальне навантаження; розривальне видовження; плосков'язальне обладнання.

Вступ. Текстильні матеріали з високоміцних ниток все частіше використовуються в промислових і військових цілях для виготовлення одягу, засобів індивідуального захисту та інших споживчих товарів, де висока стійкість волокнистої структури до різних видів механічних впливів має першочергове значення. Властивості таких матеріалів в основному обумовлені використанням різних комбінацій ниток підвищеної міцності, таких як пара-амідні, мета-амідні, високомолекулярні поліетиленові, вуглецеві, базальтові та інші високоміцні волокна й нитки з функціональними властивостями.

Розширення технічних сфер використання трикотажних матеріалів обумовило доцільність вивчення їх поведінки під дією розтягуючих зусиль з метою пошуку оптимальних рішень [1, 2].

Для оцінки міцності захисних текстильних матеріалів використовують різні показники, найпоширенішими з яких є розривальне навантаження й відносне розривальне видовження. На вказані характеристики впливає не лише вид високоміцних ниток, а й структура переплетення та параметри в'язання трикотажного матеріалу.

Традиційно величину розривального зусилля, яке витримує трикотажний матеріал до моменту розриву визначають у напрямку петельних рядів та петельних стовпчиків. Однак позаосьове розтягування є також поширеним процесом тестування та аналізу фізико-механічних властивостей трикотажних матеріалів. Багато дослідників вивчали властивості трикотажних полотен на розтяг, коли сила діє у напрямку петельного ряду [3–8]. Властивості трикотажних полотен також досліджувалися при дії сили у напрямку петельних стовпчиків [9]. Автор роботи [10] зазначає у своїх дослідженнях, що у разі використання трикотажних матеріалів для технічних потреб важливим завданням є вивчення напружень і деформацій текстильного матеріалу не лише у напрямку петельних рядів та стовпчиків, а й при зміні кута нахилу дії розтягуючої сили.

Авторами роботи [11] проведено дослідження розривних характеристик трикотажного матеріалу, коли осьові сили розтягу діють на пробу, вирізану під різними кутами відносно напрямку розташування петельних стовпчиків та рядів. Одержані результати досліджень демонструють поведінку ниток в петлях під дією прикладених під кутом до осі трикотажного матеріалу розтягуючого зусилля. Однак дані результати не можуть бути використані для аналізу впливу кута прикладання розтягуючого зусилля, оскільки для виготовлення дослідних зразків використано бавовняну пряжу, яка відрізняється за своїми фізико-механічними характеристиками від високоміцних ниток. Крім того, запропонований метод цікавим є з позиції вивчення поведінки трикотажного матеріалу для подальшого відтворення у віртуальних експериментах. У нашому випадку, для пошуку оптимальних параметрів виготовлення на в'язальному обладнанні різних типів (з платинами та без) трикотажного матеріалу, стійкого до дії механічних ушкоджень, важливим є встановлення характеру їхнього впливу на відповідні нормативні показники, величини яких визначають згідно стандартизованих методів випробовувань.

У роботі [12] розглянута поведінка розтягування та розриву нового виду матеріалу, який поєднує в собі тканину та трикотажну структуру. Розривальне зусилля прикладалося у трьох напрямках. Результати показали, що розривальні характеристики досліджуваного текстильного матеріалу тісно пов'язані з напрямком навантаження та наявністю петельної структури.

Авторами роботи [13] досліджено вплив структури переплетення на розривальні характеристики трикотажного матеріалу, виробленого двошаровим переплетенням з пресовим з'єднанням шарів основними нитками. Для формування одного шару трикотажного матеріалу обрано високомолекулярну поліетиленову нитку, а для іншого - поліамідну нитку технічного призначення. Однак, щільність в'язання не бралася як фактор впливу на характеристики міцності трикотажного матеріалу.

Робота [14] присвячена дослідженню розривних характеристик трикотажних матеріалів з високомолекулярного поліетилену різних видів переплетень: гладь, двовиворітна гладь, інтерлок та швейцарське піке. Аналіз випробовувань дозволив виявити, що трикотажний матеріал, вироблений подвійним переплетенням інтерлок за рахунок особливостей структуроутворення демонструє найбільший опір розриву та найменше видовження.

У роботі [15] висвітлено особливості переробки високомолекулярної поліетиленової нитки лінійної густини 132 текс на плосков'язальному автоматі ПА-8-33 8 класу з введенням у структуру у вигляді футерних накидів еластомерної нитки типу спандекс 100 текс, а також результати дослідження впливу щільності в'язання на розривальні характеристики трикотажу

та його стійкість до прорізування. Однак дослідні зразки трикотажного матеріалу вироблені лише при трьох рівнях глибини кулірування ($h_k = 3,5; 3,75; 4,0$ мм) та з використанням лише одного з видів високоміцних ниток.

Як відомо, трикотажний матеріал з фізичної точки зору є анізотропною структурою з еластичними властивостями [16]. Авторами роботи встановлено, що зв'язок між прикладеним зусиллям та деформацією розтягу не є лінійним [17]. Тому саме шляхом проведення експериментальних досліджень важливо краще розуміти як впливають вид використаних ниток й параметри трикотажного матеріалу, зокрема щільність в'язання, на його поведінку та характер розриву.

Постановка завдання. Аналіз наукових робіт за напрямом дослідження, дозволяє зробити висновок, що розривальне навантаження та видовження є важливими характеристиками трикотажного матеріалу підвищеної міцності. Однак у наукових працях відсутні відомості щодо впливу типу в'язального обладнання з платинами та без на розривальні характеристики трикотажу, виробленого з високомолекулярних поліетиленових та пара-арамідних ниток за умови їх однакової лінійної густини. Таким чином, для розуміння характеру опору трикотажного матеріалу, виробленого на різних типах плосков'язального обладнання з високоміцних ниток, прикладеному розривальному зусиллю під час його використання доцільним є проведення відповідних досліджень за умови зміни щільності в'язання у процесі його виготовлення.

Об'єкти і методи дослідження. Об'єктом є процес руйнування трикотажних матеріалів, вироблених з високомолекулярної поліетиленової (UHMWPE, скорочено pE) та пара-арамідної (pA) ниток на двох типах плосков'язального обладнання 8 класу: плосков'язальна машина з платинами типу ПА-8-33 (pA) та плоскофанговий напів-автомат типу ПВРК без платин.

Для забезпечення нормального перебігу процесу петлетворення на двох типах плосков'язального обладнання 8 класу з платинами та без встановлено мінімальний та максимальний рівні глибини кулірування для двох видів високоміцних ниток (пара-арамідної (pA) та високомолекулярної поліетиленової (UHMWPE – pE) лінійної густини 44текс×3 компанії Shaanxi Sunriseetech Co., Ltd., Китай. Зокрема, для рукавичкового автомата (pA) ПА-8-33, на якому утримання петель та зусилля відтягування полотна забезпечується горловинами платин, мінімальний та максимальний рівні глибини кулірування для UHMWPE нитки складають $h_{min} = 3,55$; $h_{max} = 3,95$ мм та для pA нитки $h_{min} = 3,4$; $h_{max} = 3,8$ мм. У разі вироблення зразків трикотажу на плоскофанговому напів-автоматі типу ПВРК, де зусилля відтягування полотна забезпечується гребінкою з тягарцями мінімальний та максимальний рівні глибини кулірування становлять для UHMWPE нитки $h_{min} = 3,2$; $h_{max} = 3,56$ мм та для pA нитки $h_{min} = 3,09$; $h_{max} = 3,45$ мм.

У табл. 1–2 наведено середні значення параметрів петельної структури досліджуваних трикотажних матеріалів, вироблених на плосков'язальному обладнанні двох типів (з платинами та без) при п'яти рівнях щільності в'язання, із зазначенням верхньої і нижньої межі довірчого інтервалу, у межах якого з довірчою імовірністю 95% можна чекати значення.

Для реалізації задач досліджень використано метод регресійного аналізу та одержання однофакторних математичних моделей. У якості вхідного параметра активного експерименту обрано глибину кулірування, яка змінювалася на п'яти рівнях у заданому діапазоні зміни щільності в'язання. Вихідними досліджуваними параметрами є розривальне навантаження та видовження.

Таблиця 1

Характеристика дослідних зразків трикотажних матеріалів з плосков'язальної машини без платин (типу ПВРК)

№ зразка	Величина глибини кулірування h, мм		Середні значення параметрів структури									
			довжина нитки в петлі ℓ , мм		кількість пет. стовпчиків, Nc		кількість пет. рядів, Nr		товщина M, мм		поверхнева густина ms, г/м ²	
	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA
1	3,20	3,09	8,36 ±0,08	7,93 ±0,06	49,00 ±0,44	44,85 ±0,45	54,40 ±0,46	61,50 ±0,47	1,137 ±0,011	0,895 ±0,012	344,56 ±4,371	341,78 ±5,645
2	3,29	3,18	8,51 ±0,06	8,11 ±0,04	48,50 ±0,31	44,10 ±0,32	53,45 ±0,32	60,65 ±0,34	1,133 ±0,008	0,883 ±0,008	336,72 ±3,091	334,98 ±3,069
3	3,38	3,27	8,63 ±0,05	8,20 ±0,04	47,60 ±0,25	43,30 ±0,26	52,55 ±0,26	59,80 ±0,27	1,128 ±0,006	0,873 ±0,006	329,42 ±2,524	326,42 ±1,393
4	3,47	3,36	8,71 ±0,06	8,40 ±0,04	46,70 ±0,31	42,45 ±0,32	51,60 ±0,32	59,30 ±0,34	1,123 ±0,008	0,861 ±0,008	325,14 ±3,091	319,98 ±3,069
5	3,56	3,45	8,95 ±0,08	8,55 ±0,06	46,05 ±0,44	41,40 ±0,45	51,10 ±0,46	58,50 ±0,47	1,111 ±0,011	0,840 ±0,012	317,22 ±4,371	317,06 ±5,645

Таблиця 2

Характеристика дослідних зразків трикотажних матеріалів з плосков'язальної машини з платинами (типу РА)

№ зразка	Величина глибини кулірування h, мм		Середні значення параметрів структури									
			довжина нитки в петлі ℓ , мм		кількість пет. стовпчиків, Nc		кількість пет. рядів, Nr		товщина M, мм		поверхнева густина ms, г/м ²	
	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA
1	3,55	3,40	8,58 ±0,02	8,29 ±0,02	35,50 ±0,26	41,30 ±0,21	76,70 ±0,37	63,95 ±0,34	1,383 ±0,010	0,956 ±0,013	383,84 ±6,30	312,80 ±5,36
2	3,65	3,50	8,74 ±0,01	8,51 ±0,02	35,70 ±0,18	41,10 ±0,15	74,60 ±0,26	62,45 ±0,24	1,395 ±0,007	0,966 ±0,008	376,00 ±4,08	301,84 ±3,79
3	3,75	3,60	8,91 ±0,01	8,63 ±0,01	35,90 ±0,15	40,35 ±0,12	71,25 ±0,21	59,85 ±0,19	1,405 ±0,006	0,976 ±0,006	361,44 ±4,67	296,56 ±3,10
4	3,85	3,70	9,16 ±0,01	8,81 ±0,02	36,10 ±0,18	39,90 ±0,15	67,30 ±0,26	57,40 ±0,24	1,410 ±0,007	0,992 ±0,008	351,92 ±4,08	291,20 ±3,79
5	3,95	3,80	9,33 ±0,02	8,97 ±0,02	36,80 ±0,26	39,75 ±0,21	64,30 ±0,37	55,05 ±0,34	1,421 ±0,010	1,003 ±0,013	368,64 ±6,30	288,54 ±5,36

Згідно стандартизованої методики [18] з використанням розривної машини електронного типу Као Тієн моделі КТ-7010AZ з рухомим верхнім затискачем, який рухається зі сталою швидкістю 100 мм/хв, та автоматичним вимкненням у разі руйнування матеріалу визначено розривальні характеристики дослідних зразків трикотажних матеріалів. Для проведення випробувань попередньо були підготовлені проби прямокутної форми розміром 20 мм×5 мм (у напрямку петельних рядів та стовпчиків) з вироблених на двох типах плосков'язального обладнання трикотажних матеріалів. Для визначення величини розривального навантаження й видовження розроблених зразків трикотажних матеріалів та встановлення відповідних регресійних залежностей з довірчою ймовірністю 95% виконано по 10 повторних випробувань для кожного з 5 рівнів вхідного параметра. Фото з характером

деформації та руйнування дослідних зразків трикотажних матеріалів у напрямку петельних рядів на рис.1 та у напрямку стовпчиків – на рис. 2.

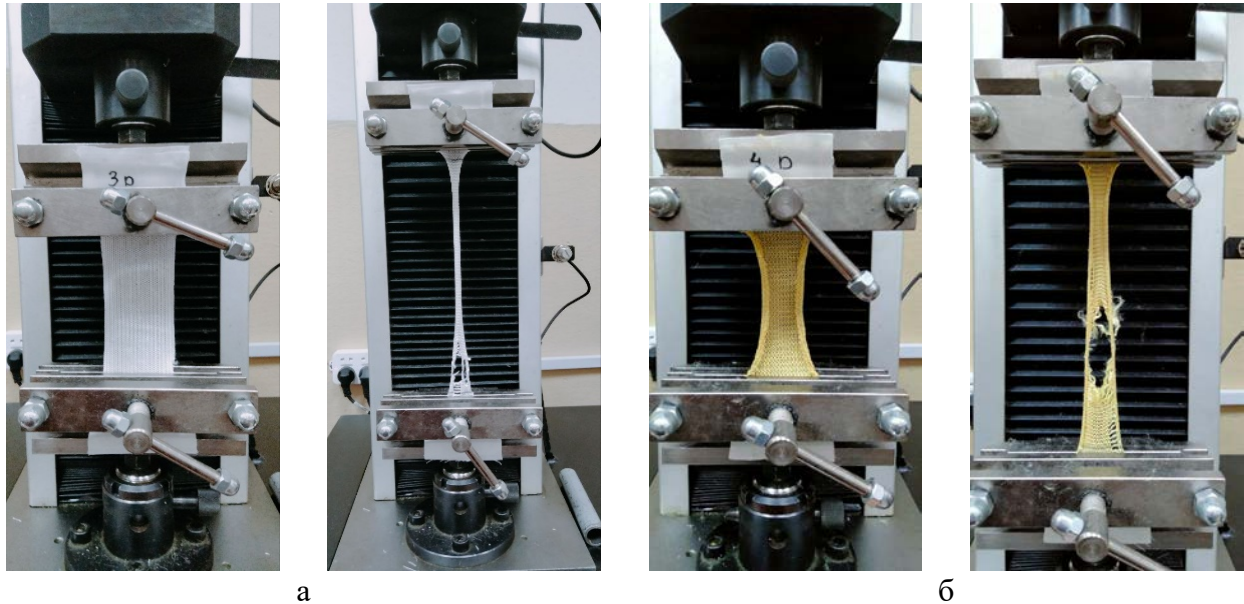


Рис. 1. Фото дослідних зразків трикотажних матеріалів, вироблених на плосков'язальному обладнанні з платинами (типу РА), у затискачах розривної машини КТ-7010АЗ у початковий момент та у момент руйнування проби у напрямку петельних стовпчиків:
а) з UHMWPE (pE) нитки; б) з pA нитки

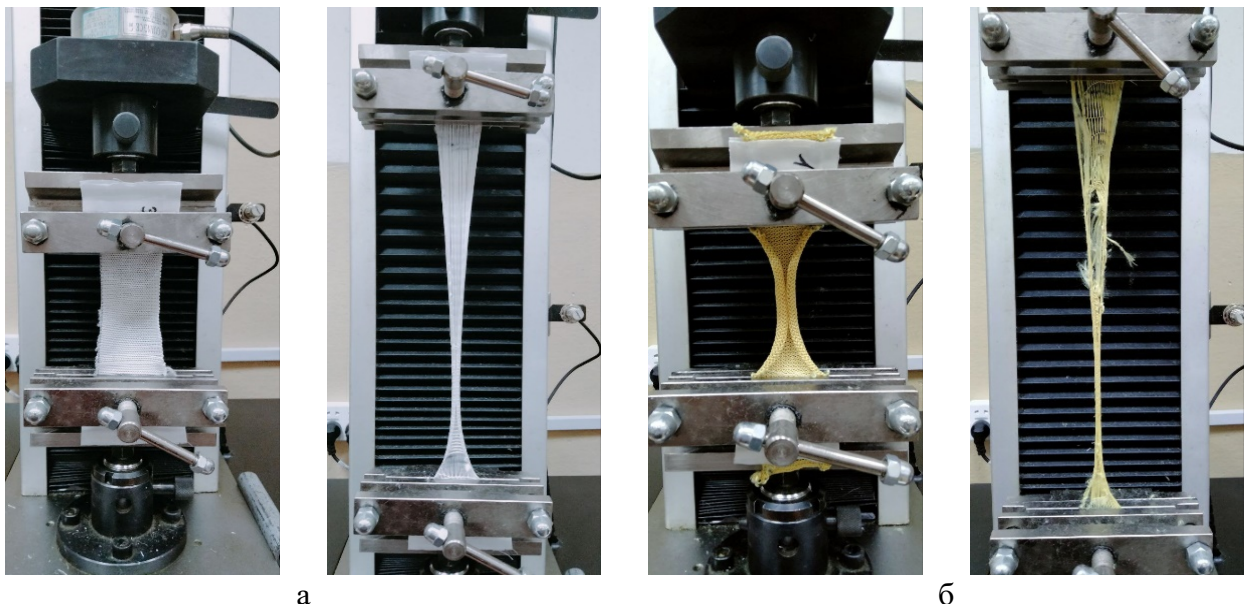


Рис. 2. Фото дослідних зразків трикотажних матеріалів, вироблених на плосков'язальному обладнанні з платинами (типу РА), у затискачах розривної машини КТ-7010АЗ у початковий момент та у момент руйнування проби у напрямку петельних рядів:
а) з UHMWPE (pE) нитки; б) з pA нитки

Результати досліджень. З метою реалізації активного експерименту [19] попередньо на рукавичковому автоматі 8 класу вироблено дослідні зразки трикотажного матеріалу трубчастої форми одинарним переплетенням кулірна гладь із зазначених видів ниток при 5 рівнях глибини кулірування нитки у визначеному діапазоні з кроком 0,1мм за умови незмінного натягу нитки у процесі в'язання; на плоскофанговому напів-автоматі типу ПВРК 8 класу – з кроком 0,09 мм.

З використанням зразків трикотажних матеріалів, одержаних на двох типах плосков'язального обладнання з платинами та без досліджено вплив щільності в'язання, та виду високоміцних ниток на розривальні характеристики. Середні значення результатів досліджень наведені відповідно для двох типів плосков'язального обладнання у табл. 3–6.

Таблиця 3

**Розривальне навантаження дослідних зразків трикотажних матеріалів
з плосков'язального обладнання без платин (типу ПВРК)**

№ зразка	Глибина кулірування h, мм		Розривальне навантаження вздовж пет. ст., Н		Питоме розривальне навантаження на один пет.ст., Н		Розривальне навантаження вздовж пет. рядів, Н		Питоме розривальне навантаження на один пет. ряд, Н	
	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA
1	3,20	3,09	2672,24 ±232,76	2482,92 ±180,74	109,07 ±9,50	110,72 ±8,06	1922,38 ±53,14	1414,50 ±79,99	70,68 ±1,95	46,00 ±2,60
2	3,29	3,18	2791,70 ±164,59	2538,44 ±127,80	115,12 ±6,79	115,12 ±5,80	1894,28 ±37,58	1373,98 ±56,56	70,88 ±1,41	45,31 ±1,87
3	3,38	3,27	3053,12 ±134,39	2575,68 ±104,35	128,28 ±5,65	118,97 ±4,82	1844,54 ±30,68	1337,76 ±46,18	70,20 ±1,17	44,74 ±1,54
4	3,47	3,36	3207,28 ±164,59	2631,78 ±127,80	137,36 ±7,05	123,99 ±6,02	1811,72 ±37,58	1286,72 ±56,56	70,22 ±1,46	43,40 ±1,91
5	3,56	3,45	3546,98 ±232,76	2743,24 ±180,74	154,05 ±10,11	132,52 ±8,73	1725,32 ±53,14	1225,00 ±79,99	67,53 ±2,08	41,88 ±2,73

Таблиця 4

**Розривальне видовження дослідних зразків трикотажних матеріалів
з плосков'язального обладнання без платин (типу ПВРК)**

№ зразка	Глибина кулірування h, мм		Розривальне видовження вздовж пет. ст., %		Питоме розривальне видовження на один пет.ст., %		Розривальне видовження вздовж пет. рядів, %		Питоме розривальне видовження на один пет. ряд, %	
	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA
1	3,20	3,09	73,02 ±3,11	89,54 ±2,75	2,98 ±0,13	3,99 ±0,12	269,44 ±8,41	204,18 ±6,40	9,91 ±0,31	6,64 ±0,21
2	3,29	3,18	75,14 ±2,20	90,40 ±1,95	3,10 ±0,09	4,10 ±0,09	263,64 ±5,95	196,40 ±4,53	9,86 ±0,22	6,48 ±0,15
3	3,38	3,27	76,76 ±1,79	91,28 ±1,59	3,23 ±0,08	4,22 ±0,07	259,84 ±4,86	191,70 ±3,70	9,89 ±0,18	6,41 ±0,12
4	3,47	3,36	80,76 ±2,20	92,54 ±1,95	3,46 ±0,09	4,36 ±0,09	256,42 ±5,95	183,48 ±4,53	9,94 ±0,23	6,19 ±0,15
5	3,56	3,45	83,24 ±3,11	93,44 ±2,75	3,62 ±0,14	4,51 ±0,13	253,72 ±8,41	178,86 ±6,40	9,93 ±0,33	6,11 ±0,22

Таблиця 5

**Розривальне навантаження дослідних зразків трикотажних матеріалів
з плосков'язального обладнання з платинами (типу РА)**

№ зразка	Глибина кулірування h, мм		Розривальне навантаження вздовж пет. ст., Н		Питоме розривальне навантаження на один пет.ст., Н		Розривальне навантаження вздовж пет. рядів, Н		Питоме розривальне навантаження на один пет. ряд, Н	
	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA
1	3,55	3,40	2018,96 ±124,17	2100,54 ±98,75	113,74 ±7,00	101,72 ±4,78	2315,80 ±120,30	1386,52 ±60,28	60,39 ±3,14	43,36 ±1,89
2	3,65	3,50	2105,72 ±87,80	2144,88 ±69,83	117,97 ±4,92	104,37 ±3,40	2300,34 ±85,07	1370,64 ±42,63	61,67 ±2,28	43,90 ±1,37
3	3,75	3,60	2265,84 ±71,69	2184,50 ±57,01	126,23 ±3,99	108,28 ±2,83	2249,96 ±69,46	1337,94 ±34,81	63,16 ±1,95	44,71 ±1,16
4	3,85	3,70	2340,92 ±87,80	2279,38 ±69,83	129,69 ±4,86	114,25 ±3,50	2159,28 ±85,07	1287,58 ±42,63	64,17 ±2,53	44,86 ±1,49
5	3,95	3,80	2395,36 ±124,17	2322,66 ±98,75	130,18 ±6,75	116,86 ±4,97	2091,06 ±120,30	1243,06 ±60,28	65,04 ±3,74	45,16 ±2,19

Таблиця 6

**Розривальне видовження дослідних зразків трикотажних матеріалів
з плосков'язального обладнання з платинами (типу РА)**

№ зразка	Глибина кулірування h, мм		Розривальне видовження вздовж пет. ст., %		Питоме розривальне видовження на один пет.ст., %		Розривальне видовження вздовж пет. рядів, %		Питоме розривальне видовження на один пет. ряд, %	
	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA
1	3,55	3,40	134,66 ±5,16	105,54 ±1,82	7,59 ±0,29	5,11 ±0,09	161,26 ±11,18	190,16 ±12,26	4,20 ±0,29	5,95 ±0,38
2	3,65	3,50	136,78 ±3,65	106,62 ±1,29	7,66 ±0,20	5,19 ±0,06	174,18 ±7,90	199,46 ±8,67	4,67 ±0,21	6,39 ±0,28
3	3,75	3,60	139,50 ±2,98	107,42 ±1,05	7,77 ±0,17	5,32 ±0,05	190,18 ±6,45	204,48 ±7,08	5,34 ±0,18	6,83 ±0,24
4	3,85	3,70	142,70 ±3,65	108,74 ±1,29	7,91 ±0,20	5,45 ±0,06	204,82 ±7,90	210,66 ±8,67	6,09 ±0,23	7,34 ±0,30
5	3,95	3,80	146,20 ±5,16	110,76 ±3,65	7,95 ±0,28	5,57 ±0,18	230,42 ±11,18	224,80 ±12,26	7,17 ±0,35	8,17 ±0,45

Слід відзначити, що характер руйнування проб трикотажних матеріалів відрізняється у разі визначення розривальних характеристик у напрямку петельних стовпчиків та рядів. А саме: у напрямку петельних стовпчиків відбувається поступове видовження проби внаслідок перерозподілу нитки з протяжок у остови петель до моменту її повного розриву (плавна крива навантаження-видовження). У разі дослідження у напрямку петельних рядів спочатку спостерігається розпуск петель у петельних стовпчиках під дією розривального зусилля, внаслідок чого крива навантаження-видовження має ступінчастий характер внаслідок стрибків напруги під час розпуску петель. І лише після повного розпуску петель в петельних стовпчиках відбувається руйнування ниток в окремих рядах до моменту настання повного розриву проби (рис. 3).

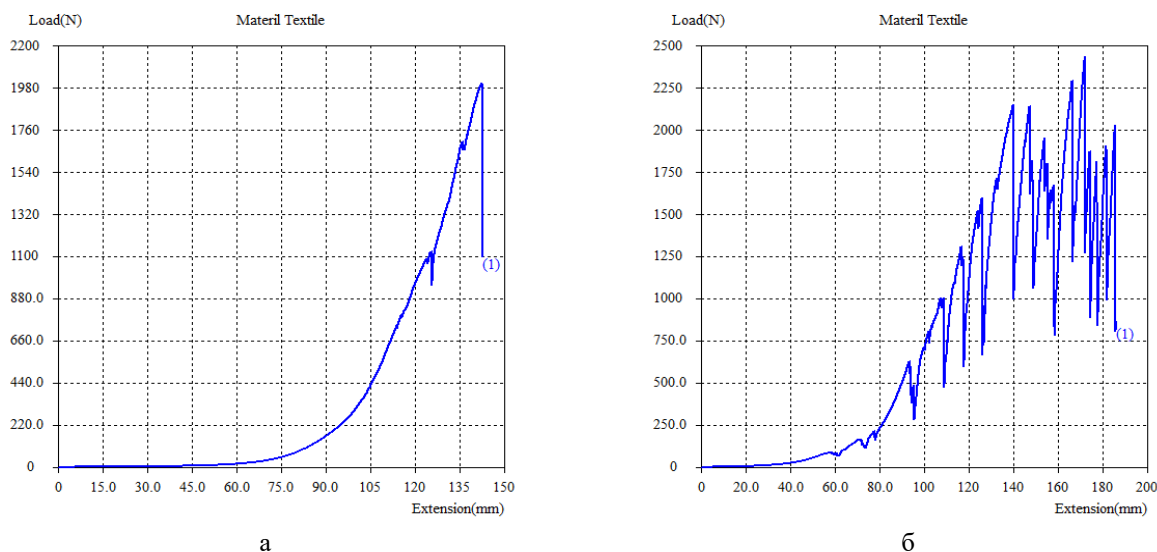


Рис. 3. Приклад графіків розриву трикотажного матеріалу на машині КТ-7010AZ, виготовлених з UHMWPE нитки при мінімальному рівні глибини кулірування на плосков'язальному обладнанні з платинами (типу PA):
а) вздовж петельних стовпчиків; б) вздовж петельних рядів

Шляхом регресійного аналізу одержаних результатів випробувань встановлено математичні залежності, на підставі яких побудовано відповідні графіки. Графіки, наведені на рис. 4–7 наглядно ілюструють вплив щільності в'язання на величину розривального навантаження та видовження.

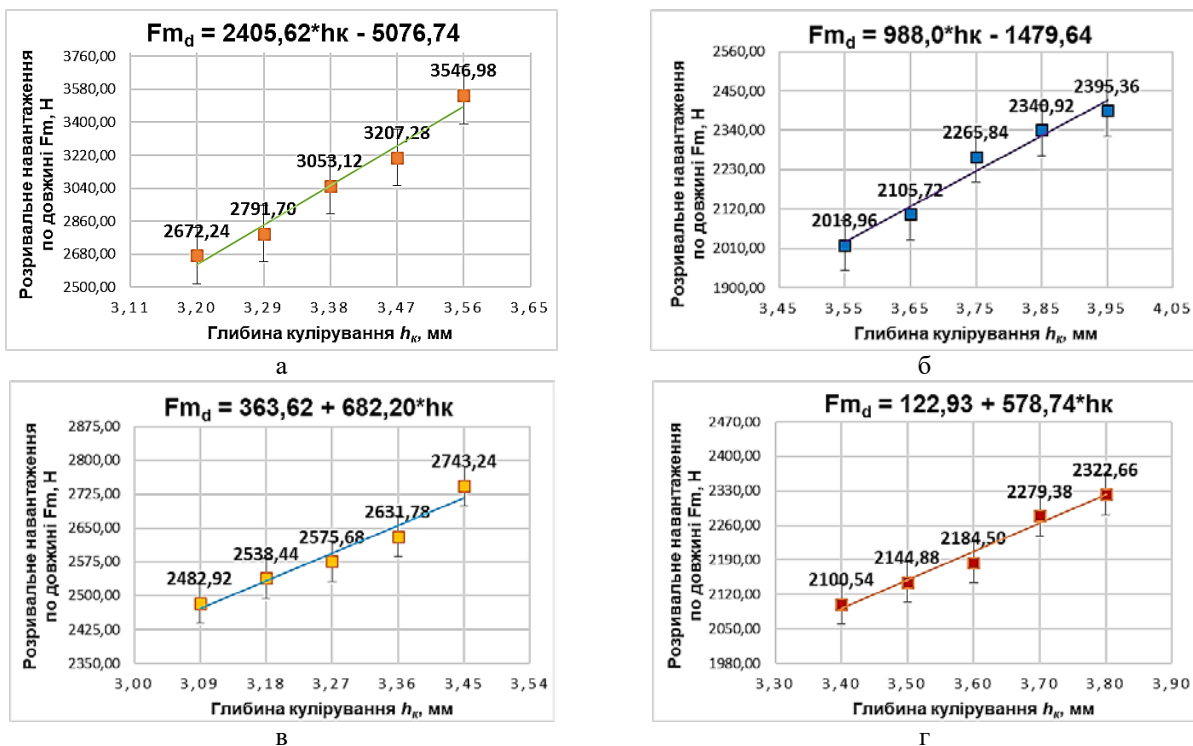


Рис. 4. Розривальне навантаження вздовж петельних стовпчиків трикотажного матеріалу, виробленого на плосков'язальному обладнанні без платин типу ПВРК: а) з UHMWPE нитки; в) з PA нитки з платинами типу PA: б) з UHMWPE нитки; г) з PA нитки

Як видно з графіків, наведених на рис. 4, зі збільшенням глибини кулірування при формуванні петель, величина розривального навантаження, яке витримують дослідні зразки трикотажних матеріалів по довжині, не залежно від виду високоміцних ниток та типу плосков'язального обладнання зростає та має лінійний характер зміни. Це обумовлено тим, що зменшення щільності в'язання забезпечує кращий перерозподіл нитки з протяжок в остови петель. Під дією розривального зусилля відбувається ущільнення структури за рахунок зменшення величини платинних дуг суміжних петель. При цьому, чим щільніша структура, тим за менший відрізок часу під дією розривального зусилля відбувається перерозподіл нитки з протяжок в палички остовів петель та руйнування елементарних волокон в нитці у точках переплетення. Слід також зауважити, що використання pE ниток дозволяє досягнути кращих результатів міцності трикотажного матеріалу внаслідок дії розривального зусилля. Зокрема, за умови мінімального рівня глибини кулірування, використання pE ниток на плосков'язальному обладнанні без платин (типу ПВРК) дозволяє збільшити величину розривального навантаження на 7,62% порівняно зі зразками з pA ниток (рис. 4 а, в). У разі використання плосков'язального обладнання з платинами (типу РА) зміна виду високоміцних ниток не має такого суттєвого впливу (близько 2–4% в залежності від рівня глибини кулірування, що є в межах похибки вимірювань) (рис. 4 б, г). Одержані результати досліджень вказують на те, що тип плосков'язального обладнання з платинами та без для виготовлення дослідних зразків впливає на величину розривального навантаження за умови використання одного виду високоміцних ниток. Зокрема: при мінімальному рівні глибини кулірування та використанні pE ниток зміна типу плосков'язального обладнання з ПВРК (без платин) на РА (з платинами) призводить до зменшення міцності трикотажного матеріалу на 24,45% (рис. 4 а, б); при використанні pA ниток – на 15,4% (рис. 4 в, г).

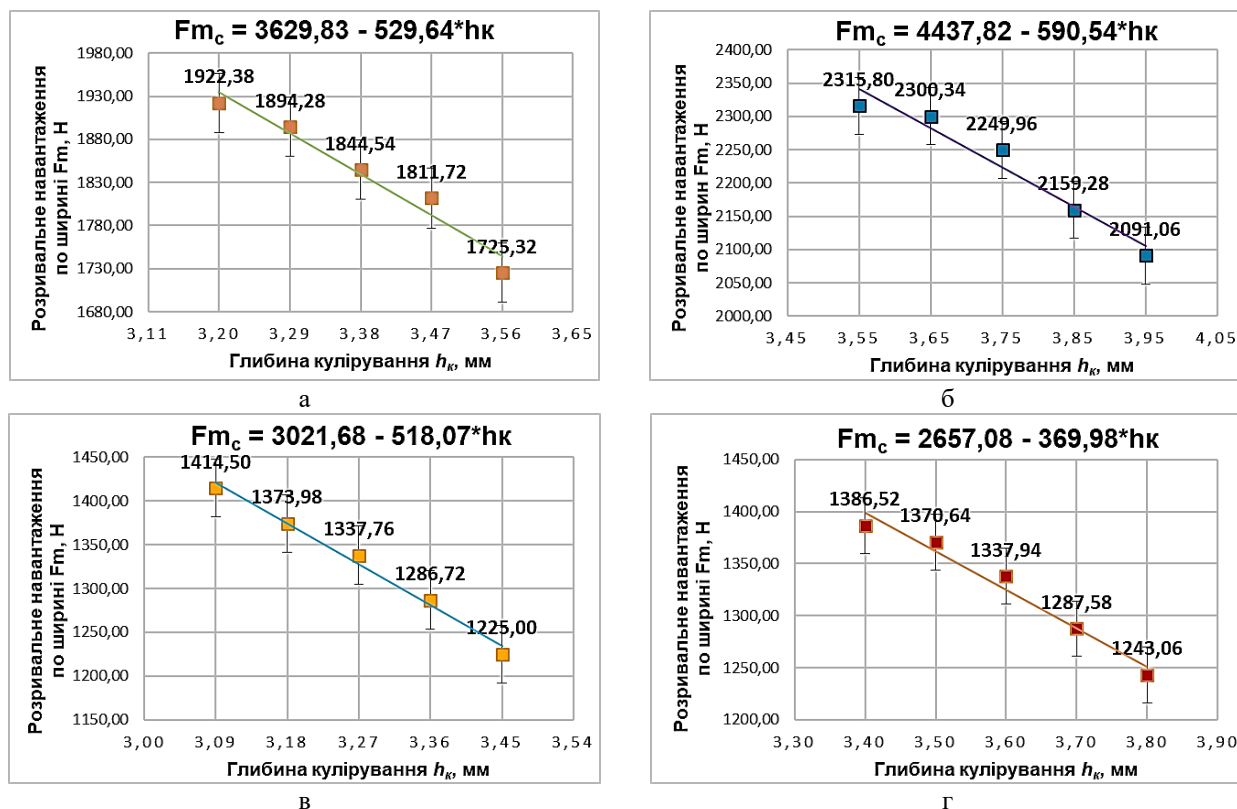


Рис. 5. Розривальне навантаження вздовж петельних рядів трикотажного матеріалу, виробленого на плосков'язальному обладнанні без платин типу ПВРК: а) з UHMWPE нитки; в) з pA нитки з платинами типу РА: б) з UHMWPE нитки; г) з pA нитки

У разі прикладення розривального зусилля до трикотажного матеріалу вздовж лінії петельного ряду збільшення глибини кулірування при формуванні петель призводить до зменшення його міцності (рис. 5), що обумовлено характером опору матеріалу прикладеному розривальному зусиллю, який описано вище. Зменшення щільності в'язання полегшує розпуск петель під дією прикладеного розривального зусилля і відповідно за менший відрізок часу розриву опирається вже не трикотажний матеріал з точками переплетень, а прямолінійні відрізки ниток.

Графіки, наведені на рис. 5, наглядно ілюструють, що на величину розривального навантаження по ширині має вплив і вид високоміцних ниток, і тип плосков'язального обладнання. У разі використання рЕ ниток при мінімальній щільності в'язання використання плосков'язального обладнання з платинами дозволяє збільшити міцність на 84,4% (рис. 5, а, б), у разі рА ниток – лише на 17,87% (рис. 5 в, г). Це обумовлено формуванням зигзагоподібної будови петель в петельних стовпчиках у разі використання плосков'язального обладнання без платин при виробленні трикотажного матеріалу з рА ниток.

За умови мінімального рівня глибини кулірування використання рЕ ниток на плосков'язальному обладнанні без платин (типу ПВРК) дозволяє збільшити величину розривального навантаження по ширині на 35,91% порівняно зі зразками з рА ниток (рис. 5 а, в). У разі використання плосков'язального обладнання з платинами (типу РА) зміна виду високоміцних ниток з рА на рЕ призводить до зростання величини розривального зусилля, яке витримує дослідний зразок трикотажного матеріалу по ширині, на 67,02% (рис. 5 б, г).

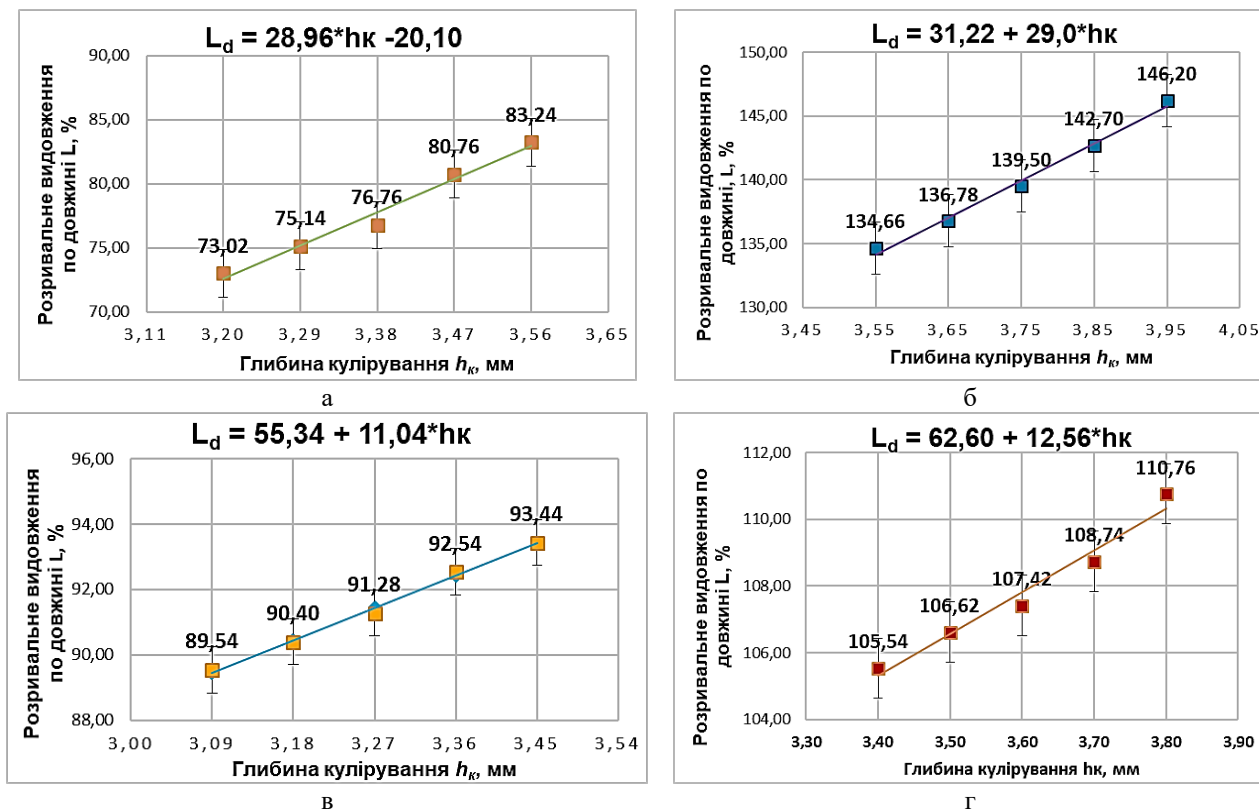


Рис. 6. Розривальне видовження вздовж петельних стовпчиків трикотажного матеріалу, виробленого на плосков'язальному обладнанні без платин типу ПВРК:
а) з UHMWPE нитки; в) з рА нитки з платинами типу РА:
б) з UHMWPE нитки; г) з рА нитки

У ході дослідження впливу щільності в'язання на величину розривального видовження виявлено різний характер зміни у напрямку петельних стовпчиків рис. 6 та рядів рис. 7. Так у випадку досліджень проб вздовж петельних стовпчиків розривальне видовження зі збільшенням глибини кулірування при формуванні петель зростає (рис. 6). А у випадку напрямку прикладання розривального зусилля вздовж петельних рядів у зразках з плосков'язального обладнання без платин (типу ПВРК) збільшення глибини кулірування призводить до зменшення величини розривального видовження (рис. 7 а, в). При виготовленні зразків на плосков'язальному обладнанні з платинами, зменшення щільності в'язання у заданому діапазоні призводить до зростання величини розривального видовження (рис. 7 б, г). Це можна пояснити різницею в орієнтації ниток в петлях трикотажного матеріалу на етапі їх формування. У разі участі у формуванні петель платин, відрізок нитки в петлі в області платинної дуги петлі має постійну задану величину, а збільшення глибини кулірування призводить до зростання величини відрізка нитки в області паличок петель. Саме цей факт і призводить до збільшення величини розривального видовження зі збільшенням глибини кулірування.

Як видно з графіків, наведених на рис. 6 а та б, при використанні рЕ ниток, зміна типу плосков'язального обладнання з ПВРК на РА за умови мінімальної глибини кулірування призводить до зростання розривального видовження по довжині на 84,42% внаслідок можливості перерозподілу нитки з платинних дуг петель в палички. У разі використання рА ниток, зміна типу плосков'язального обладнання призводить до зростання розривального видовження по довжині лише на 17,87% (рис. 6 в, г), що обумовлено зигзагоподібною будовою петель в петельних стовпчиках трикотажного матеріалу з рА ниток на машині без платин.

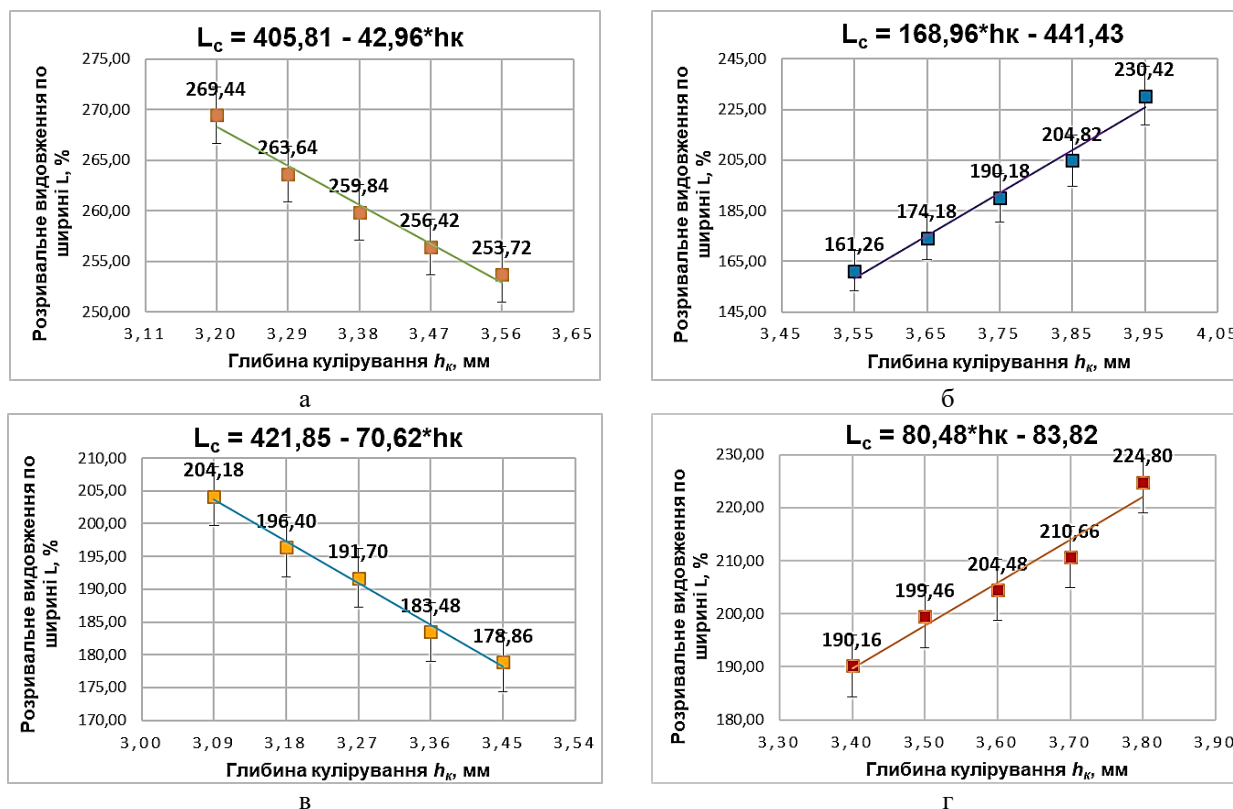


Рис. 7. Розривальне видовження вздовж петельних рядів трикотажного матеріалу, виробленого на плосков'язальному обладнанні без платин типу ПВРК: а) з UHMWPE нитки; в) з рА нитки з платинами типу РА: б) з UHMWPE нитки; г) з рА нитки

Графіки, наведені на рис. 7, наглядно ілюструють, що характер зміни розривального видовження трикотажного матеріалу вздовж петельних рядів залежить не лише від виду високоміцних ниток, а й від типу плосков'язального обладнання: у разі виготовлення на машині без платин зменшується, а у випадку використання машини з платинами навпаки зростає. Зокрема, при використанні *pE* ниток розривальне видовження по ширині зі зміною плосков'язального обладнання з ПВРК на РА за умови мінімальної глибини кулірування зменшується на 40,15% (рис. 7 а, б), а у разі використання *pA* ниток – на 6,87% (рис. 7 в, г). Незначний вплив типу плосков'язального обладнання на величину розривального видовження обумовлений, як вже зазначалося, зигзагоподібною будовою петель у петельних стовпчиках трикотажного матеріалу, виробленого на плосков'язальному обладнанні без платин.

За умови мінімального рівня глибини кулірування використання *pE* ниток на плосков'язальному обладнанні без платин (типу ПВРК) дозволяє збільшити величину розривального видовження по ширині на 31,96% порівняно зі зразками з *pA* ниток (рис. 7 а, в). У разі використання плосков'язального обладнання з платинами (типу РА) зміна виду високоміцних ниток з *pA* на *pE* навпаки призводить до зменшення величини розривального видовження дослідного зразка трикотажного матеріалу по ширині на 15,20% (рис. 7 б, г).

Цікавим також є співставлення величин питомого розривального навантаження та видовження на один петельний стовпчик чи ряд в залежності від напряму розтягу. На рис. 8 та рис. 9 наведено діаграми питомого розривального навантаження та видовження, що припадає на один петельний стовпчик чи ряд трикотажного матеріалу, одержаного на плосков'язальному обладнанні з платинами та без в залежності від щільності в'язання.

Представлені діаграми наглядно ілюструють характер впливу типу в'язального обладнання та виду використаних надміцних ниток на величину питомого розривального навантаження та видовження. Величина питомого розривального навантаження в першу чергу обумовлена формою петель, що залежить не лише від фізико-механічних характеристик високоміцних ниток, а й від типу плосков'язального обладнання: з платинами чи без.

Як видно з рис. 8 а, у заданому діапазоні зміни щільності в'язання, питоме розривальне навантаження на один петельний стовпчик для дослідних зразків, вироблених з *pE* ниток на машині типу ПВРК без платин зростає на 41,24%, на машині з платинами типу РА – лише на 14,45%. У разі вироблення з *pA* ниток на машині типу ПВРК без платин зростає на 19,69, на машині типу РА з платинами – на 14,88% (рис. 8 в).

Аналіз зміни величини питомого розривального навантаження на один петельний ряд у заданому діапазоні зміни щільності в'язання дозволив з'ясувати, що у випадку використання *pE* ниток для зразків трикотажу, вироблених на машині без платин (типу ПВРК), зменшується на 4,46%, а у разі вироблення на машині з платинами (типу РА) навпаки зростає на 7,69% (рис. 8 б). У випадку використання *pA* ниток та машини без платин (типу ПВРК) зменшується на 8,96%, а у разі вироблення на машині з платинами (типу РА) навпаки зростає на 4,15% (рис. 8 г).

Як видно з діаграм, наведених на рис. 9, зміна щільності в'язання у заданому діапазоні має менш суттєвий вплив на питоме розривальне видовження на один петельний стовпчик в межах обраного виду обладнання та високоміцних ниток. Але зміна типу в'язального обладнання є впливовим фактором. Так при мінімальному рівні глибини кулірування зміна типу плосков'язального обладнання з ПВРК на РА призводить до зростання питомого розривального видовження вздовж петельних стовпчиків у випадку використання *pE* ниток у 2,55 рази, у випадку *pA* ниток – у 1,28 рази (рис. 9 а, в). Тобто різниця зменшується.

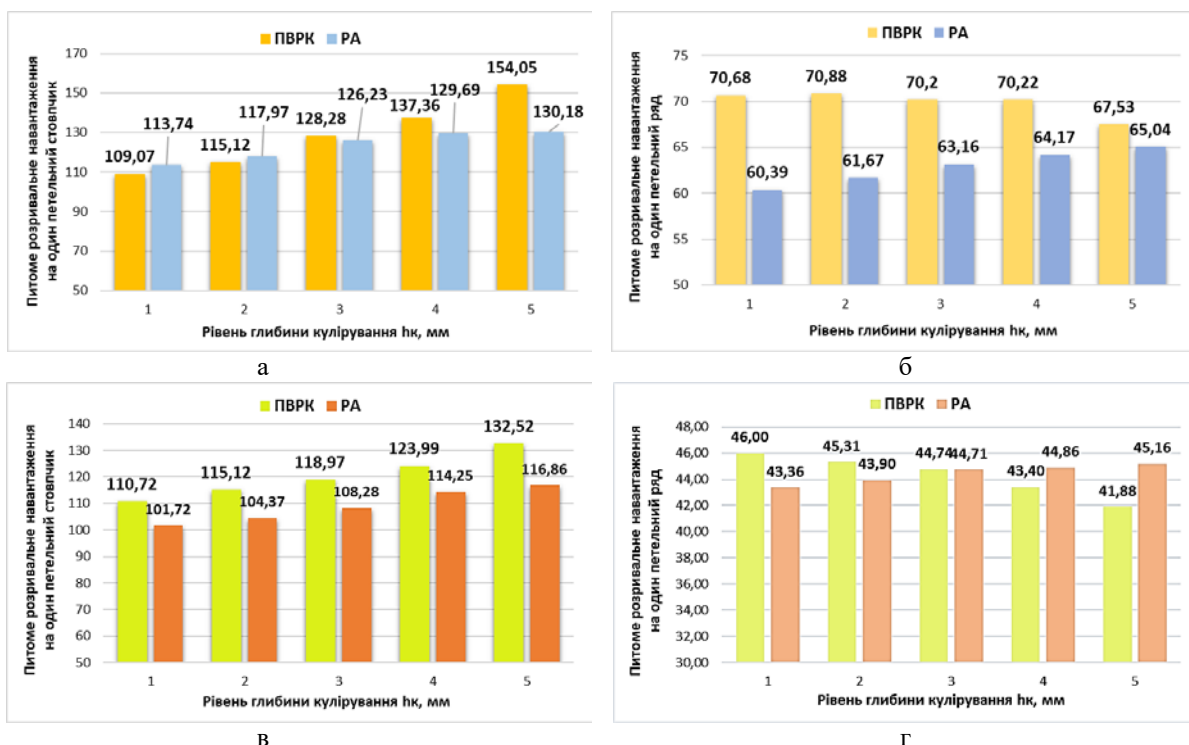


Рис. 8. Діаграми величини питомого розривального навантаження: для зразків з UHMWPE нитки: а) на один петельний стовпчик; б) на один петельний ряд; для зразків з PA нитки: в) на один петельний стовпчик; г) на один петельний ряд

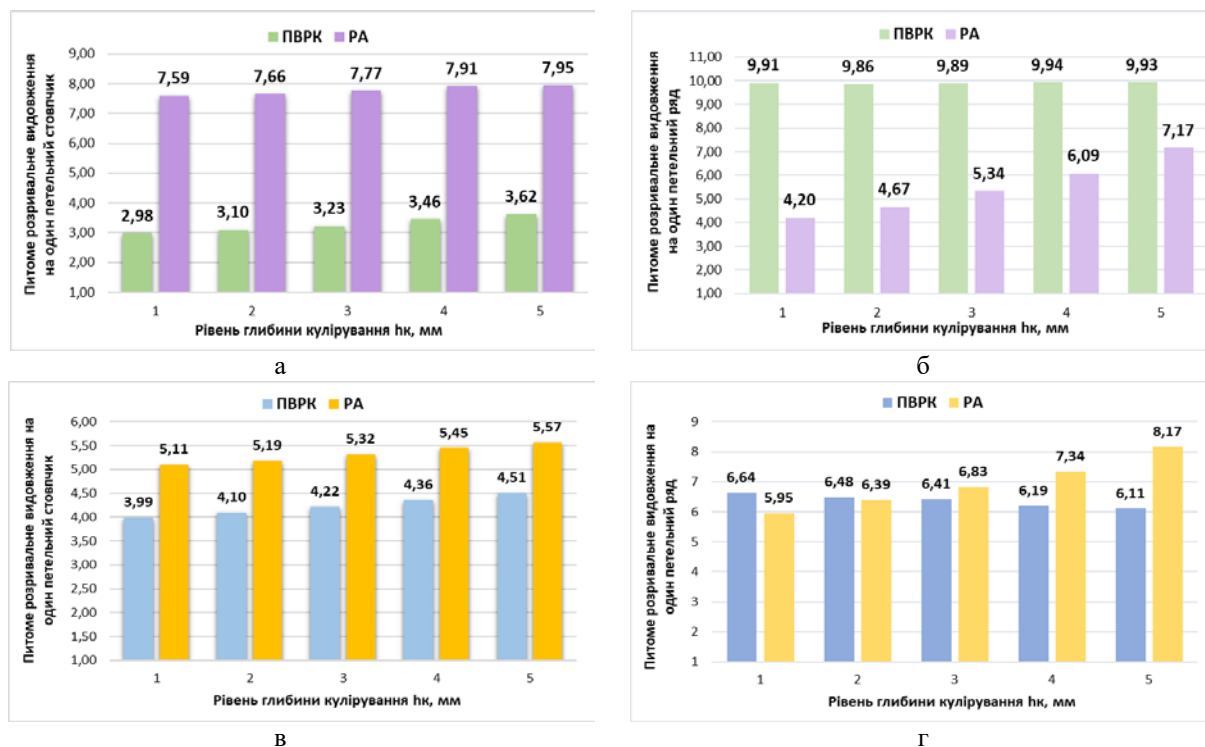


Рис. 9. Діаграми величини питомого розривального видовження: для зразків з UHMWPE нитки: а) на один петельний стовпчик; б) на один петельний ряд; для зразків з PA нитки: в) на один петельний стовпчик; г) на один петельний ряд

У випадку використання pE ниток при мінімальному рівні глибини кулірування, зміна обладнання для виготовлення трикотажного матеріалу з машини типу ПВРК на машину типу РА призводить до зменшення питомого розривального видовження на один петельний ряд у 2,36 рази, у випадку використання pA ниток – до зменшення у 1,12 разів (рис. 9 б, г). Аналогічно, як і у випадку з величиною питомого розривального видовження на один петельний стовпчик, у разі використання пара-арамідних ниток різниця зменшується при зміні типу плосков'язального обладнання.

Висновок: Одержані у ході реалізації активного експерименту однофакторні регресійні математичні залежності дозволять у відповідності до обраних величини глибини кулірування нитки, типу плосков'язального обладнання з платинами чи без, визначати на етапі проєктування розривальні характеристики трикотажних матеріалів з високомолекулярних поліетиленових та пара-арамідних ниток.

У ході досліджень виявлено, що на величину розривального навантаження та видовження впливає тип обраного плосков'язального обладнання. Участь у процесі формування петель на плосков'язальній машині типу РА платин, обумовлює задану величину нитки в області платинної дуги петлі.

У разі переробки пара-арамідних ниток на плосков'язальному обладнанні без платин типу ПВРК, внаслідок прояву пружних властивостей зігнутого в петлю відрізка нитки, формується зигзагоподібна будова остовів петель у петельному стовпчику, що й обумовлює інший характер руйнування проби та вплив на величину розривального навантаження та видовження порівняно зі зразками трикотажних матеріалів з високомолекулярних поліетиленових ниток.

References

1. Ramakrishna, S. (1997). Characterization and modeling of the tensile properties of plain weft-knit fabric-reinforced composites. *Compos Sci Technol*, 57: 1–22.
2. Zhangyu, F. Z., Yanmo, C., Hairu, L. (2006). Effects of prestretching on the tensile properties of knitted glass fiber fabric reinforced polypropylene composite. *J Thermoplast Compos*, 19: 399–411.
3. Hepworth, B. (1978). The biaxial load-extension behavior of a model of plain weft-knitting-part I. *J Text Inst*, 69: 101–107.
4. Shanahan, W. J., Postle, R. (1974). A theoretical analysis of the tensile properties of plain-knitted fabrics. Part I: the load extension curve for fabric extension parallel to the courses. *J Text Inst*, 65: 200–212.
5. MacRory, B. M., McCraith, R., McNamara, A. B. (1975). The biaxial load-extension properties of plain weft-knitted fabrics- a theoretical analysis. *Text Res J*, 45: 746–760.
6. MacRory, B. M., McNamara, A. B. (1967). Knitted fabrics subjected to biaxial stress-an experimental study. *Text Res J*, 37: 908–911.

Література

1. Ramakrishna S. Characterization and modeling of the tensile properties of plain weft-knit fabric-reinforced composites. *Compos Sci Technol*. 1997. Vol. 57. P. 1–22.
2. Zhangyu F. Z., Yanmo C., Hairu L. Effects of prestretching on the tensile properties of knitted glass fiber fabric reinforced polypropylene composite. *J Thermoplast Compos*. 2006. Vol. 19. P. 399–411.
3. Hepworth B. The biaxial load-extension behavior of a model of plain weft-knitting-part I. *J Text Inst*. 1978. Vol. 69. P. 101–107.
4. Shanahan W. J., Postle R. A theoretical analysis of the tensile properties of plain-knitted fabrics. Part I: the load extension curve for fabric extension parallel to the courses. *J Text Inst*. 1974. Vol. 65. P. 200–212.
5. MacRory B. M., McCraith R., McNamara A. B. The biaxial load-extension properties of plain weft-knitted fabrics- a theoretical analysis. *Text Res J*. 1975. Vol. 45. P. 746–760.
6. MacRory B. M., McNamara A. B. Knitted fabrics subjected to biaxial stress-an experimental study. *Text Res J*. 1967. Vol. 37. P. 908–911.

7. Popper, P. (1966). The theoretical behavior of a knitted fabric subjected to biaxial stresses. *Text Res J*, 36: 148–157.
8. Hong, H. et al. (2002). Theoretical analysis of load-extension properties of plain weft knits made from high performance yarns for composite reinforcement. *Text Res J*, 72: 991–995.
9. Shanahan, W. J., Postle, R. (1974). A theoretical analysis of the tensile properties of plain-knitted fabrics part II: the initial load-extension behaviour for fabric extension parallel to the wales. *J Text Inst*, 65: 254–260.
10. Kurbak, A. (2017). Geometrical and mechanical modelings of dry relaxed slack plain knitted fabrics for the benefit of technical textile applications part I: a geometrical model. *Text Res J*, 87: 838–852.
11. Penava, Ž., Penava, D. Š., Miloš, L. (2020). Experimental and analytical analyses of the knitted fabric off-axes tensile test. *Textile Research Journal*, 91: 62–72. DOI: 10.1177/0040517520933701.
12. Ma, P., Jiang, G., Gao, Z., Zhang, Q., Xia, D. (2014). Tension and tear behaviors of co-woven-knitted fabric with photograph investigation. *Fibers and Polymers*, 15(2): 382–389. DOI: 10.1007/s12221-014-0382-x.
13. Bobrova, S. Yu., Halavska, L. Ye., Kulyk, A. A. (2018). Deformatsiini kharakterystyky trykotazhu pidvyshchenoi mitsnosti. [Deformation characteristics of high strength knitted fabrics]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii Tekhnichni nauky = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Series Technical sciences*, 6(128): 56–63. DOI: <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2018.6.6> [in Ukrainian].
14. Mengge Jia, Mengjin W, Ruosi Yan, Xiaohong Ma, Sainan Wei, Wei Zhang (2020). Study on manufacturing and mechanical properties of UHMWPE knitted structural reinforcement in composites. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 446, 022048. DOI: 10.1088/1755-1315/446/2/022048.
15. Bobrova, S. Yu. (2018). Rozrobka trykotazhu dlia zakhystu ruk vid mekhanichnykh nebezpek. [Knitwear development for hand protection against mechanical hazards]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky = Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 5: 242–246 [in Ukrainian].
16. Leaf, G. A., Glaskin, A. (1955). The geometry of plain knitted loop. *J Text Inst*, 25: T587–T605.
7. Popper P. The theoretical behavior of a knitted fabric subjected to biaxial stresses. *Text Res J*. 1966. Vol. 36. P. 148–157.
8. Hong H. et al. Theoretical analysis of load-extension properties of plain weft knits made from high performance yarns for composite reinforcement. *Text Res J*. 2002. Vol. 72. P. 991–995.
9. Shanahan W. J., Postle R. A theoretical analysis of the tensile properties of plain-knitted fabrics part II: the initial load-extension behaviour for fabric extension parallel to the wales. *J Text Inst*. 1974. Vol. 65. P. 254–260.
10. Kurbak A. Geometrical and mechanical modelings of dry relaxed slack plain knitted fabrics for the benefit of technical textile applications part I: a geometrical model. *Text Res J*. 2017. Vol. 87. P. 838–852.
11. Penava Ž., Penava D. Š., Miloš L. Experimental and analytical analyses of the knitted fabric off-axes tensile test. *Textile Research Journal*. 2020. Vol. 91. P. 62–72. DOI: 10.1177/0040517520933701.
12. Ma P., Jiang G., Gao Z., Zhang Q., Xia D. Tension and tear behaviors of co-woven-knitted fabric with photograph investigation. *Fibers and Polymers*. 2014. Vol. 15 (2). P. 382–389. DOI: 10.1007/s12221-014-0382-x.
13. Боброва С. Ю., Галавська Л. Є., Кулик А. А. Деформаційні характеристики трикотажу підвищеної міцності. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2018. № 6 (128). С. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2018.6.6>.
14. Mengge Jia, Mengjin W, Ruosi Yan, Xiaohong Ma, Sainan Wei, Wei Zhang. Study on manufacturing and mechanical properties of UHMWPE knitted structural reinforcement in composites. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. 446. 022048. DOI: 10.1088/1755-1315/446/2/022048.
15. Боброва С. Ю. Розробка трикотажу для захисту рук від механічних небезпек. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 5. С. 242–246.
16. Leaf G. A., Glaskin A. The geometry of plain knitted loop. *J Text Inst*. 1955. Vol. 25. P. T587–T605.

17. Bueno, M.-A. (2008). Structure and mechanics of knitted fabrics. In: Schwartz P (ed.). *Structure and mechanics of textile fibre assemblies* (pp. 84–113). Cambridge: Woodhead Publishing.

18. DSTU EN ISO 13934-1:2018 Текstyl. Rozryvni vlastyvoli tkanyn. Chastyna 1. Vyznachennia maksimalnoho zusyillia ta vydovzhennia za maksimalnoho zusyillia metodom priamokutnoho shmatka [State Standard 13934-1:2018. Textiles. Tensile properties of fabrics. Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method]. EN ISO 13934-1:2013, IDT; ISO 13934-1:2013, IDT. Valid from 07/20/2018. Publication is official. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 18 p.

19. Klochko, O. (2006). Doslidzhennia u trykotazhnii promyslovosti: navch. posibnyk dlia stud. vyshchykh navch. zakl. [Research in the knitted industry: study guide]. Kyiv: KNUTD [in Ukrainian].

17. Bueno M.-A. Structure and mechanics of knitted fabrics. In: Schwartz P (ed.). *Structure and mechanics of textile fibre assemblies*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. P. 84–113.

18. ДСТУ EN ISO 13934-1:2018 Текстиль. Розривні властивості тканин. Частина 1. Визначення максимального зусилля та видовження за максимального зусилля методом прямокутного шматка. (EN ISO 13934-1:2013, IDT; ISO 13934-1:2013, IDT). Чинний від 20.07.2018. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2018. 18 с.

19. Клочко О. І. Дослідження у трикотажній промисловості: навч. посібник для студ. вищих навч. закл. К.: КНУТД, 2006. 190 с.

DMYTRYK OKSANA

Postgraduate student,
Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8638-9632>
Scopus Author ID: 57225127346
E-mail: dmytryk.om@knutd.edu.ua

HALAVSKA LIUDMYLA

Doctor of Technical Science, Professor,
Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6994-6641>
Scopus Author ID: 57191413261
ResearcherID: O-1750-2018
E-mail: galavska.ly@knutd.edu.ua

DMYTRYK O. M, HALAVSKA L. Ye.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**STUDY OF THE INFLUENCE OF FLAT KNITTING EQUIPMENT TYPE
ON THE BREAKING LOAD AND ELONGATION OF KNITTED FABRIC
MADE FROM HIGH-STRENGTH THREADS**

Purpose. Study of the effect of changing of flat knitting equipment type (with or without sinkers) affects the strength characteristics of the knitted material of the plain interloping, made of high molecular weight polyethylene and para-aramid threads.

Methodology. The work is based on the theory of knitting, methods of analysis and synthesis of the obtained results, the use of the basics of textile material science. The resistance characteristics of the developed knitted material samples were determined using the KT-7010AZ electronic tearing machine and in accordance with standardized methodology. In order to identify the effect of knitting density on the amount of tensile load and elongation of the studied samples of knitted materials, the method of linear regression analysis was implemented in the traditional planning of an active experiment. The Microsoft Excel program was used to process the results of the experiment and draw graphs based on the average values of the indicators.

The results. In the course of the research, it was found that the type of flat knitting equipment affects the breaking characteristics of knitted material made from high molecular weight polyethylene and para-aramid threads, namely: the presence or absence of sinkers when forming loops. The participation of sinkers in the process of looping determines the formation of a given length of the thread in the area of the sinker of the loops. This, in turn, affects the tensile elongation of the knitted material. Samples of knitted material from

high molecular weight polyethylene threads showed better results in terms of resistance to the applied breaking force both in the direction of course and in the direction of wales. The value of the specific elongation at break per wale or course, in the case of producing knitted material on flat-knitting equipment without sinkers with a general takedown force of the fabric, a change in knitting density has a slight effect (up to 5%).

Scientific novelty. The nature of the influence of flat-knitting equipment type (with and without sinkers) on the strength characteristics of the knitted material of the plain interloping, made from high-molecular polyethylene and para-aramid threads, has been established.

Practical significance. The regression dependencies obtained during the experiment make it possible to determine the value of the breaking load and elongation of the knitted material of the plain interloping, made from high molecular weight polyethylene and para-aramid threads, in accordance with the selected type of flat knitting equipment and the knockover depth value.

Keywords: para-aramid thread; ultra-high molecular weight polyethylene thread; durable knitted material; plain interloping; breaking load; breaking elongation; flat knitting equipment.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.9>

УДК 678.65.
98.41

БУЛГАКОВ Є. С., ПУШКАРЬОВ Д. В., САВЧЕНКО Б. М.,
СОВА Н. В., СЛЄПЦОВ О. О.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕТКАНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПОЛІЛАКТИДУ

Мета дослідження. Метою даної статті є дослідження та порівняння фізичних та механічних властивостей нетканих матеріалів, виготовлених з полілактиду та поліпропілену.

Методи дослідження. Неткані полімерні матеріали з поліпропілену та полілактиду отримували методом аеродинамічного розпилення розплаву на приймальний барабан (melt-blown) на лабораторній установці. Фізико-механічні характеристики, такі як міцність та видовження на розрив оцінювали за допомогою розривної машини Р-5 (згідно з ISO 5725-1). Реологічні характеристики досліджених полімерів було оцінено шляхом вимірювання показника течії розплаву згідно з ISO 1133.

Результати. Дослідним шляхом підтверджено можливість виготовлення нетканого матеріалу з полілактиду на устаткуванні, придатному для переробки поліпропілену. Досліджені параметри структури волокон, видовження та міцність при розриві. Встановлено, що нетканий матеріал з полілактиду має у 7–30 разів вищу міцність при розриві та у 7–10 разів менше видовження при розриві порівняно з нетканим матеріалом з поліпропілену у дослідженому інтервалі медіанних діаметрів волокон.

Наукова новизна. Встановлено залежність фізико-механічних властивостей нетканих матеріалів від середнього діаметру елементарних волокон.

Практична значимість. Встановлено технологічні можливості застосування полілактиду в якості матеріалу для виготовлення нетканих фільтрувальних матеріалів.

Ключові слова: поліпропілен; полілактид; неткані матеріали; фізико-механічні властивості.

Вступ. Неткані матеріали є важливою групою технічних матеріалів, що займає значне місце у сучасній індустрії. Вони характеризуються відсутністю традиційного переплетення ниток чи волокон, яке характерне для тканин, і вирізняються структурою, що формується шляхом механічного, хімічного або термічного зв'язування волокон. Цей процес виробництва дозволяє створювати матеріали з різноманітною мікроструктурою та фізичними властивостями, що задовольняють потреби різних галузей.

Неткані матеріали можуть бути поділені на декілька основних типів в залежності від способу їхнього виробництва та структури. Методи виробництва включають в себе механічне пресування, гаряче проклеювання, прядіння волокон, а також методи, що використовують ультразвук та лазерне зварювання.

Характеристики нетканих матеріалів можна регулювати в залежності від вимог конкретних застосувань. Вони можуть бути водовідштовхувальними, дихаючими, міцними, гіпоалергенними, абсорбуючими, а також мати електростатичні властивості. Ці характеристики роблять їх вельми популярними у виробництві одягу, медичних виробів, фільтрів, будівельних матеріалів та інших промислових секторах [1].

Загальний інтерес до нетканих матеріалів пояснюється їхньою високою продуктивністю, економічністю та гнучкістю у виробництві. Вони можуть бути виготовлені з різних типів сировини, включаючи природні та синтетичні волокна, що дозволяє отримувати матеріали з різними властивостями та додатковими функціями.

Синтетичні матеріали відіграють ключову роль у виробництві нетканих матеріалів, які знаходять широке застосування у різних галузях промисловості та побуту. Ці матеріали виробляються шляхом хімічного синтезу з використанням нафтопродуктів або природних

газів і можуть мати різну хімічну будову та фізичні властивості в залежності від їхнього призначення та технологічних вимог [2].

Один з найпоширеніших синтетичних матеріалів для виробництва нетканих матеріалів – поліпропілен. Поліпропілен є термопластичним полімером, який відрізняється легкістю, міцністю та хімічною стійкістю. Виробництво нетканих матеріалів з поліпропілену зазвичай здійснюється за допомогою методу гарячого пресування або спрямованого розтягнення, що дозволяє отримати матеріал з високою міцністю та стійкістю до зношування [3, 4].

У цілому, синтетичні матеріали забезпечують широкі можливості для виробництва нетканих матеріалів з різноманітними характеристиками, що відповідають вимогам конкретних застосувань у промисловості та побуті.

У сучасному промисловому виробництві, матеріали, виготовлені з поліпропілену, займають важливе місце серед нетканих матеріалів. Поліпропілен – це термопластичний полімер, який характеризується легкістю, високою міцністю, хімічною стійкістю та низькою здатністю до вологопоглинання. Він широко використовується у виробництві нетканих матеріалів через свої властивості, які роблять його ідеальним для різних застосувань [5, 6].

Отримані неткані матеріали з поліпропілену мають декілька переваг. Вони легкі, міцні, мають високу стійкість до розриву та зносу, а також стійкі до впливу хімічних речовин. Такі матеріали знаходять широке застосування у різних сферах, включаючи текстильну промисловість (одяг, білизна), медичну та гігієнічну сферу (хірургічні маски, медичні компреси), а також у виробництві упаковки, фільтрів, будівельних матеріалів та багатьох інших галузях.

Використання нетканих матеріалів з поліпропілену у системах фільтрації повітря є важливим аспектом для забезпечення чистого та безпечного внутрішнього середовища у різних сферах застосування. Ці матеріали володіють рядом унікальних властивостей, які роблять їх ефективними для затримання шкідливих часток та забруднень у повітрі.

Процес виробництва нетканих матеріалів з поліпропілену для фільтрування повітря починається з екструзії сировини, де плавлені поліпропіленові волокна формуються через отвори екструдера. Далі ці волокна піддаються спрямованому розтягуванню та орієнтації, що покращує їхні механічні властивості та забезпечує більш ефективне утримання часток.

Неткані матеріали з поліпропілену для фільтрування повітря можуть мати різну мікроструктуру та товщину, що визначає їхню ефективність у фільтрації різних типів забруднень. Вони можуть бути одношаровими або містити багатошарову конструкцію для підвищення ефективності фільтрації [7].

Важливими характеристиками нетканих матеріалів з поліпропілену для фільтрування повітря є їхня висока проникливість для повітря, стійкість до вологи та хімічних реагентів, а також міцність та довговічність. Ці властивості роблять їх ідеальними для використання у різноманітних системах очищення повітря, таких як побутові та промислові фільтри, системи вентиляції, а також у медичних пристроях та засобах індивідуального захисту [8].

Узагальнюючи, неткані матеріали з поліпропілену для фільтрування повітря відіграють важливу роль у забезпеченні здорового та безпечного середовища для людей у різних сферах життя та роботи. Їхні унікальні властивості роблять їх ефективними та надійними засобами фільтрації повітря.

Поліпропіленові неткані матеріали є важливими компонентами у багатьох галузях, включаючи текстильну, медичну, пакувальну та інші промислові сфери. Два з основних методів виготовлення поліпропіленових нетканих матеріалів, що здобули широке застосування, - це методи спанбонд та метод аеродинамічного розпилення розплаву (melt-blown).

Метод спанбонд є одним із найпоширеніших способів виробництва поліпропіленових нетканих матеріалів. Цей процес включає в себе кілька кроків. Спочатку, поліпропіленові

гранули розплавляється та екструдується через головку з отворами, що формує тонкі волокна. Потім ці волокна розташовуються на поверхні та направляються на конвеєр, де вони піддаються пресуванню та з'єднанню під впливом тиску та тепла. Цей процес створює сильно в'язку мережу волокон, утворюючи нетканий матеріал з потрібними властивостями.

Метод аеродинамічного розпилення розплаву (мелт-блаун) використовується для виробництва нетканих матеріалів з маслянистого стану поліпропілену. У цьому методі сировину розплавляють, а потім пропускають через тонке сопло, роздуваючи повітрям високого тиску. Далі ці волокна збираються на поверхні рулону або конвеєра, де вони охолоджуються та з'єднуються, утворюючи нетканий матеріал [9, 10].

Обидва методи виготовлення – спанбонд та мелт-блаун – є ефективними для отримання поліпропіленових нетканих матеріалів з різними властивостями та застосуваннями. Вони забезпечують широкий спектр можливостей у виробництві та дозволяють отримувати матеріали з різноманітними структурами та характеристиками, що відповідають потребам різних галузей промисловості.

Незважаючи на значну поширеність та широке застосування неткані матеріали з поліпропілену важко піддаються вторинній переробці та не піддаються біотичному розкладу. В умовах глобальної пандемії відбулося стрімке зростання споживання виробів з нетканого поліпропілену та суттєве накопичення його відходів у довкіллі. Важливим завданням вбачається пошук екологічно прийнятних альтернатив до поліпропіленових нетканих матеріалів. Найбільш придатним для цього є полілактид.

Неткані матеріали, виготовлені з полімолочної кислоти (PLA), представляють собою новий рубіж у інноваційних матеріалах, що тільки починають розвиватися. Вироблені з відновлюваних ресурсів, таких як кукурудзяний крохмаль або цукрова тростина, неткані матеріали на основі полілактиду пропонують значні екологічні переваги порівняно з традиційними матеріалами на основі нафти, такими як поліпропілен. Процес виробництва нетканих матеріалів з полілактиду передбачає формування волокон з розплаву полімеру, а потім різні методи скріплення волокон, такі як термічні або хімічні методи для формування нетканого матеріалу, так само як і для інших термопластичних полімерів.

Незважаючи на те, що неткані матеріали з полілактиду здатні біологічно розкладатися та зменшують викиди вуглецю, вони часто стикаються з проблемами, пов'язаними з меншою механічною міцністю та вищими витратами на виробництво порівняно з поліпропіленом. Вищі витрати пов'язані з двома факторами: порівняно висока ціна на вихідну сировину та необхідність в попередній сушці полілактиду. Сушка полімеру викликає потребу в додатковому технологічному устаткуванні, ускладнює виробничий процес, додаючи додаткові етапи, та збільшує витрати на електроенергію, в той час як поліпропілен переробляється без попередньої сушки. Також, полілактид має на 25% вищу щільність за поліпропілен, тобто за отримання волокна з тим самим ефективним об'ємом волокон потрібно значно більше полілактиду, ніж поліпропілену. Незважаючи на ці недоліки, зростаючий попит на екологічно чисті альтернативи спонукає до досліджень і розробок, спрямованих на підвищення продуктивності та економічності нетканих матеріалів на основі PLA, прокладаючи шлях для стійких рішень у різних сферах застосування, починаючи від гігієнічних засобів і закінчуючи пакуванням і не тільки [10, 11].

У минулих роботах нами було продемонстровано можливість виготовлення фільтрувальних нетканих матеріалів з полілактиду на обладнанні для виробництва поліпропіленових нетканих матеріалів. Фільтрувальна здатність таких нетканих полотен, виготовлених з полілактиду виявилась вище за полотна з поліпропілену за подібних медіанних діаметрів волокон полімерів [12].

Постановка завдання. Дослідження можливості виготовлення нетканого матеріалу з біорозкладаного полімеру та визначення його властивостей в порівнянні з нетканим матеріалом з поліпропілену.

Вихідні матеріали та методи. У даному дослідженні для виготовлення експериментальних зразків були використані поліпропілен марки PP Sabic 519A (Саудівська Аравія) та полілактид від Luminy PLA L130 (Total Corbion PLA, Таїланд).

Експериментальні зразки обох нетканих матеріалів були виготовлені за методом аеродинамічного розпилення розплаву на приймальний барабан, відомим як melt-blown, застосованому на лабораторній установці для виробництва волокнистих матеріалів (див. рис. 1). Установка складалася з одношнекового екструдера, обладнаного електронною системою керування нагріванням та приводом, тобто пристроєм (1). Розплав, що утворився в екструдері, надходив до голівки (2), де відбувалося розпилення його шляхом подачі нагрітого стисненого повітря. Для цього використовувалось атмосферне повітря, яке проходило через фільтр (5) та повітродувку (4), і нагрівалося в калорифері (3) до температури процесу. Струмінь розплаву полімеру, підхоплений потоком гарячого повітря, спрямовувався на приймальний барабан (6), який обертався навколо своєї осі та переміщувався циклічно-поступально у горизонтальній площині. Обертання та поперечне переміщення приймального барабану забезпечувалися приводом (8) і траверсою (9), і дозволяли рівномірно заповнити поверхню барабану напиленим полімерним матеріалом. Приймальний барабан був оснащений розгладжуючим роликком (7), який ущільнював отриманий нетканый матеріал.

Перед подальшою обробкою матеріали було висушено в сушарній шафі при температурі 60°C протягом 12 годин.

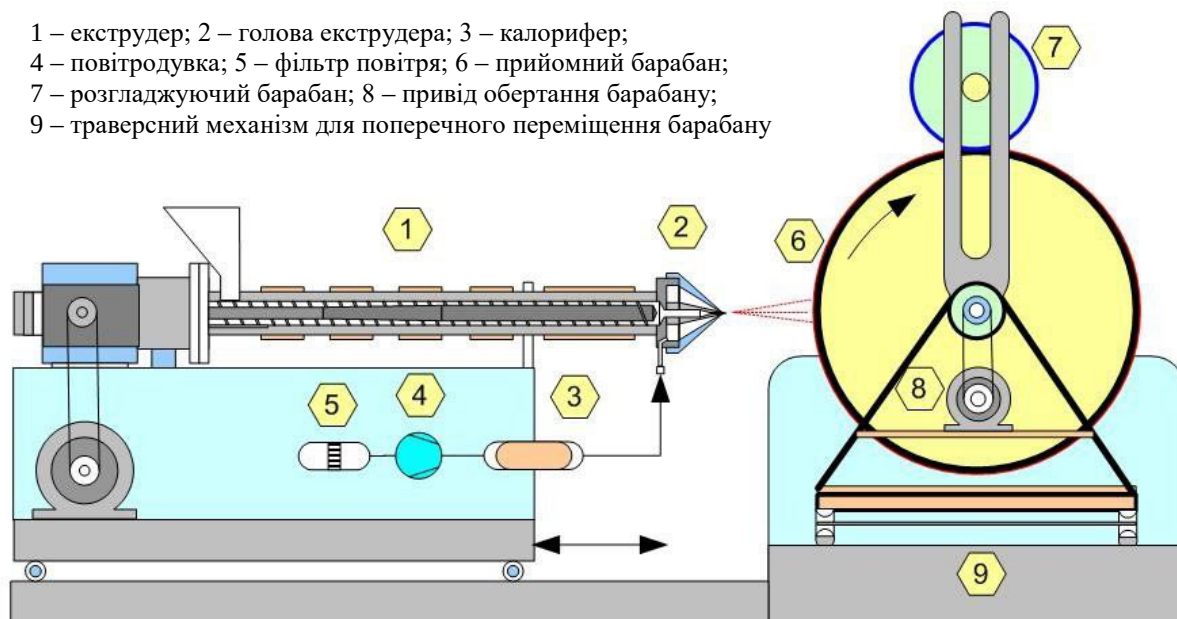


Рис. 1. Схема лабораторної установки для виготовлення волокнистих матеріалів методом розпилення розплаву

Процес формування волокон за допомогою аеродинамічного методу потребує встановлення певних реологічних характеристик матеріалів, які досягаються шляхом належного вибору температурних параметрів обробки.

Реологічні характеристики досліджених полімерів було оцінено шляхом вимірювання показника течії розплаву згідно з ISO 1133. Для поліпропілену та полілактиду було визначено

показник текучості розплаву для вихідного сировинного матеріалу і готового нетканого матеріалу та густину (табл. 1).

Таблиця 1

Властивості вихідних полімерних матеріалів

Властивості		Поліпропілен	Полілактид
ПТР, г/10хв (230 °С; 2,16 кг)	Гранула	32	28
	Нетканый матеріал	89	41
ПТР, г/10хв (210 °С; 2,16 кг)	Гранула	25	22
	Нетканый матеріал	61	36
Густина, кг/м ³		905	1244

У процесі переробки в нетканому матеріалі відбувається термічна та окисна деструкція, що призводить до підвищення ПТР поліпропілену та полілактиду, що є типовим для даного методу переробки. Досягнення значення в'язкості розплаву, яке необхідно для формування нетканого матеріалу, відбувається за допомогою вибору сировини з визначеною початковою в'язкістю розплаву, а також шляхом регулювання технологічних параметрів процесу, а саме температурних режимів переробки та тривалості перебування розплаву у екструзійному устаткуванні. Таким чином, задля отримання необхідного медіанного діаметру волокна відповідним чином регулювалися температури у зонах 1–4. За підвищення температури термічна деструкція відбувається швидше та, відповідно, в'язкість розплаву зменшується більше, що дозволяє отримувати волокна меншого діаметру за одного тиску та витрати повітря. Так, температури підбиралися мінімальні та достатні для отримання волокон діаметром 6–10 мкм (стандартний діапазон медіанних діаметрів волокон медичних фільтрувальних масок). Зворотнім чином виглядає залежність в'язкості розплаву від продуктивності (частоти обертів шнеку). Так, за збільшення швидкості обертання основного двигуна та, відповідно, продуктивності екструдера збільшується в'язкість розплаву через менший час перебування полімеру в екструдері та, відповідно, меншої кількості теплоти, сприйнятої полімером. В ході дослідження було обрано технологічні параметри, за яких продуктивність екструдера була максимальною достатньою, а температура – мінімальною достатньою для отримання дослідних зразків з необхідним розподілом діаметрів волокон та найменшою термічною деструкцією полімеру, задля запобігання втрати полімером фізико-механічних властивостей через деструкцію.

Температурні режими переробки поліпропілену та полілактиду приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Температурні режими формування нетканого матеріалу

Полімерний матеріал	Температура, °С				
	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4 (головка екструдера)	Зона 5 (повітря)
Поліпропілен	245	300	285	270	385
Полілактид	235	245	255	245	385

Параметри переробки поліпропілену та полілактиду відрізняються за температурами: для поліпропілену необхідна вища температура переробки (приблизно 250–300°С), у порівнянні з полілактидом (приблизно 200–240°С). Ця різниця обумовлена відмінностями у початкових реологічних характеристиках матеріалів.

Наведені параметри переробки одержані дослідним шляхом та забезпечують оптимальні умови функціонування устаткування [7].

В процесі переробки основним фактором впливу на структуру нетканого матеріалу є продуктивність екструзії та витрата повітря при формуванні, а також швидкість приймання матеріалу на барабан. Комплексне регулювання цих параметрів дозволяє отримувати нетканий матеріал з певним статистичним розподілом розмірів елементарних волокон.

Характеристики розподілу параметрів волокон оцінювали за методикою описаною в роботі [7].

В процесі досліджень було отримано по три зразки нетканих полотен з поліпропілену та полілактиду з різними діапазонами значень середнього діаметру волокон при наступних технологічних параметрах (табл. 3).

Таблиця 3

Технологічні параметри отримання дослідних зразків

Параметри	Полілактид			Поліпропілен		
Зразок №	1	2	3	4	5	6
Медіанний діаметр волокна, мкм	6,2	8,9	10,2	6,0	8,9	10,0
Продуктивність, г/год	354,0	1239,0	1770,0	265,5	929,3	1327,5
Швидкість повітря, м/с	18,8	23,7	23,7	27,8	27,8	31,1
Тиск повітря, мбар	2,1	3,4	3,4	4,7	4,7	5,8
Відстань до прийомного барабану, см	248,0	339,0	519,0	226,0	261,0	326,0
Швидкість прийому на барабан, м/с	3,9	5,5	6,7	5,9	5,9	5,9

Зразки 1, 2 та 3 відрізняються цільовим медіанним діаметром волокна: 6 мкм, 9 мкм та 10 мкм відповідно. Технологічні параметри підбиралися відповідно, задля отримання полотна з заданим медіанним діаметром волокон. В той час як продуктивність екструдера, швидкість та тиск повітря напряму впливають на медіанний діаметр волокон, відстань до прийомного барабану та швидкість прийому на барабан напряму на нього не впливають. Швидкість прийому та відстань до прийомного барабану обиралися з огляду на гомогенність полотна. За збільшення продуктивності екструдера конус розпилення розплаву зменшується, так як зменшується питомий тиск повітря на одиницю маси розплаву. Так, за занадто близького розташування сопла до прийомного барабану, поверхня полотна є бугристою, а за занадто далекого розташування конус розпилення розплаву виходить за межі прийомного барабану.

Для вимірювання товщини нетканого полотна використовували цифровий мікрометр марки Mitutoyo, модель C/N 293-821-30. Вимірювання кожного зразка здійснювали у п'яти різних точках, визначаючи середнє значення показника.

Механічні випробування здійснювали на руйнівній машині марки Р-5 з комп'ютерною системою вимірювання. Зразки нетканих матеріалів готували до випробування шляхом висікання фасонною висічною рамкою на гідравлічному пресі. Висічну рамку перед висіканням нагрівали у сушарній шафі до температури 100°C. Частини зразка, що фіксуються у затискачах руйнівної машини укріплювали шляхом занурення в рідку епоксидну композицію та її отвердження на протязі 24 годин.

Отримані результати випробувань при розтязі були піддані ретельному аналізу за допомогою статистичного програмного забезпечення Microsoft Excel.

Результати дослідження. Методом аеродинамічного розпилення розплаву на барабан було отримано 6 зразків нетканих полотен: 3 з поліпропілену та 3 з полілактиду, по три зразки різних медіанних діаметрів волокон. Усереднені дані випробувань фізико-механічних характеристик по кожному з медіанних діаметрів волокон наведено в таблиці 4.

Показники міцності при розриві та видовження при розриві, отримані за допомогою розривної машини було приведено до питомих значень на одиницю щільності полотна. Також, було усереднено дані, отримані при вимірюваннях зразків у напрямку потоку розплаву – за діаметром барабану (MD) та перпендикулярно йому – по ширині барабану (TD).

Таблиця 4

Механічні властивості дослідних зразків

Властивості	Полілактид			Поліпропілен		
Медіанний діаметр волокна, мкм	6,19	8,86	10,17	6,02	8,91	10,02
Площинна щільність зразку, г/м ²	354,0	1239,0	1770,0	265,5	929,3	1327,5
Видовження при розриві, % (MD)	2,20	2,68	5,78	13,00	18,00	56,40
Видовження при розриві, % (TD)	2,60	3,48	8,13	13,20	18,20	60,40
Міцність при розриві, МПа (MD)	0,87	4,56	8,40	0,12	0,14	0,28
Міцність при розриві, МПа (TD)	0,59	3,32	6,20	0,08	0,08	0,13

Отримані результати свідчать, що фізико-механічні показники зростають пропорційно зростанню медіанного діаметру волокна.

Поліпропіленові неткані полотна з подібним медіанним розміром волокон володіють нижчою за полілактид поверхневою щільністю, завдяки нижчому значенню густини полімеру.

Водночас неткані полотна з полілактиду володіють значно вищим значенням міцності при розриві, що ймовірно обумовлено орієнтацією під час формування та властивостями полімеру.

Для обох матеріалів спостерігається анізотропія властивостей вздовж та поперек приймального барабану, що зумовлено особливостями формування та розподілом волокон. Орієнтація волокон, котра відбувається при формуванні, реалізується у напрямку вздовж приймального барабану в переважній мірі.

Зразки нетканого матеріалу з полілактиду характеризуються низьким значенням видовження при розриві. Дана особливість зумовлює крихкий характер руйнування зразків з полілактиду та пластичність зразків з поліпропілену. Таким чином, полілактид в якості сировини для виготовлення нетканих фільтрувальних матеріалів має обмеження для застосувань, що потребують високої еластичності або міцності на роздир. Наприклад, до таких застосувань можуть відноситися медичні маски індивідуального захисту. В той час як полілактид підходить до застосування у виробках, що потребують високої жорсткості, наприклад, фільтри для механічної очистки води.

Крихкий характер руйнування зразків полілактиду може слугувати обмежуючим фактором для багатьох застосувань. Актуальним напрямком подальших досліджень бачиться модифікація полілактиду для досягнення пластичного та або еластичного характеру руйнування.

Висновки. Встановлено, що неткані полотна виготовлені з полілактиду мають вищу міцність на розрив, та менше видовження на розрив порівняно з полотнами подібного медіанного діаметру волокна, виготовленими з поліпропілену. Експериментально досліджено різницю у фізико-механічних характеристиках нетканих матеріалів з полілактиду та поліпропілену. Встановлено, що нетканий матеріал з полілактиду має у 7–30 разів вищу міцність при розриві та у 7–10 разів менше видовження при розриві порівняно з нетканим матеріалом з поліпропілену у дослідженому інтервалі медіанних діаметрів волокон. Показано, що неткані матеріали з полілактиду придатні до застосування в умовах, що вимагають високої міцності, в той час як поліпропіленові неткані матеріали доцільно застосовувати для виробів, що вимагають високої еластичності. Досліджено вплив умов орієнтації під час формування волокон на фізико-механічні характеристики нетканих матеріалів.

References

1. Subhash Kumar Batra, Behnam Pourdeyhi (2012). Introduction to Nonwovens Technology. DEStech Publications.

Література

1. Subhash Kumar Batra, Behnam Pourdeyhi. Introduction to Nonwovens Technology. DEStech Publications, 2012.

2. Mukhopadhyay, S. (2014). Natural and synthetic fibres for composite nonwovens. *Composite Non-Woven Materials. Structure, Properties and Applications*, 2014, P. 20–29.
3. Gupta, B. S., Wilkes, G. L. (2015). Some properties of nonwoven fabrics formed via melt blowing. *Journal of Applied Polymer Science*, No. 13 (5), P. 1019–1033.
4. Bhat, G. S., Nanjundappa, R. (2013). Bond Structure and Tensile Properties of Thermal Bonded Polypropylene Nonwovens. *Textiles and Light Industrial Science and Technology (TLIST)*, Vol. 2, Iss. 2.
5. Hinrichsen, E. (1995). Relationships between the properties of fibers and thermally bonded nonwoven fabrics made of polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 1995, P. 1633–1645.
6. Khan, M. A., Tawabini, B. S., Mohamed, S. E. (2019). The effect of spunbonding process parameters on properties of polypropylene/polyethylene terephthalate (PP/PET) nonwoven fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, No. 49 (1), P. 97–115.
7. Gopalakrishnan, D. (2014). SPUNBONDED NONWOVEN – An Overview. URL: https://www.academia.edu/9381347/SPUNBONDED_NONWOVENS_An_Overview.
8. Ahn, S. H., Lee, K. S., Kim, H. (2018). Development of polypropylene-based nanofiber filter media for high-efficiency particulate air filtration. *Textile Research Journal*, No. 88 (9), P. 1060–1070.
9. Bhattacharya, S., Sen, K. (2017). Melt-blown technology: extrusion system, structure, properties and applications. *Handbook of nonwovens*, 2017, P. 243–275.
10. Nakajima, T., Aoki, Y., Inui, T. (2019). Thermally bonded nonwoven fabric made from melt-blown microfibers of polypropylene/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends. *Journal of Applied Polymer Science*, No. 136 (18), Art. 47453.
11. Avérous, L., Pollet, E. (2012). Environmental silicate nano-biocomposites. In *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics* (pp. 69–102). William Andrew Publishing.
2. Mukhopadhyay S. Natural and synthetic fibres for composite nonwovens. *Composite Non-Woven Materials. Structure, Properties and Applications*. 2014. P. 20–29.
3. Gupta B. S., Wilkes G. L. Some properties of nonwoven fabrics formed via melt blowing. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. No. 13 (5). P. 1019–1033.
4. Bhat G. S., Nanjundappa R. Bond Structure and Tensile Properties of Thermal Bonded Polypropylene Nonwovens. *Textiles and Light Industrial Science and Technology (TLIST)*. 2013. Vol. 2, Iss. 2.
5. Hinrichsen E. Relationships between the properties of fibers and thermally bonded nonwoven fabrics made of polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 1995. P. 1633–1645.
6. Khan M. A., Tawabini B. S., Mohamed S. E. The effect of spunbonding process parameters on properties of polypropylene/polyethylene terephthalate (PP/PET) nonwoven fabrics. *Journal of Industrial Textiles*. 2019. No. 49 (1). P. 97–115.
7. Gopalakrishnan D. SPUNBONDED NONWOVEN – An Overview. 2014. URL: https://www.academia.edu/9381347/SPUNBONDED_NONWOVENS_An_Overview.
8. Ahn S. H., Lee K. S., Kim H. Development of polypropylene-based nanofiber filter media for high-efficiency particulate air filtration. *Textile Research Journal*. 2018. No. 88 (9). P. 1060–1070.
9. Bhattacharya S., Sen K. Melt-blown technology: extrusion system, structure, properties and applications. *Handbook of nonwovens*. 2017. P. 243–275.
10. Nakajima T., Aoki Y., Inui T. Thermally bonded nonwoven fabric made from melt-blown microfibers of polypropylene/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. No. 136 (18). Art. 47453.
11. Avérous L., Pollet E. Environmental silicate nano-biocomposites. In *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*

12. Bulhakov, Ye. S., Savchenko, B. M., Iskandarov, R. Sh., Svistilnik, R. F., Pushkarov, D. V. (2023). Zastosuvannia biorozkladnykh polimeriv pry vyhotovlenni nektanykh filtruvalnykh materialiv [Application of biodegradable polymers in the manufacture of nonwoven filter materials]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, No. 3(14), P. 36–46. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.4> [in Ukrainian].

(pp. 69–102). William Andrew Publishing, 2012.

12. Булгаков Є. С., Савченко Б. М., Іскандаров Р. Ш., Свістільнік Р. Ф., Пушкарьов Д. В. Застосування біорозкладних полімерів при виготовленні нектаних фільтрувальних матеріалів. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 3(14). Р. 36–46. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.4>.

BULHAKOV YEVHENII

Postgraduate Student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: Yevhenii.bulhakov97@gmail.com

SAVCHENKO BOHDAN

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8636-5734>
Scopus Author ID: 56685269800
E-mail: 1079@ukr.net

PUSHKAROV DENYS

Postgraduate Student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-0855-7403>
E-mail: global23412@gmail.com

SOVA NADIYA

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3550-6135>
Scopus Author ID: 56685569600
E-mail: djanc@ukr.net

SLIEPTSOV ALEXANDR

PhD, Assistant, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3550-6135>
Scopus Author ID: 57189215952
E-mail: slyepcov.oo@kntd.edu.ua

**BULHAKOV Y. S., PUSHKARYOV D. V., SAVCENKO B. M.,
SOVA N. V., SLIEPTSOV O. O.**

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**RESEARCH OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
NONWOVEN MATERIALS BASED ON POLYLACTIC ACID**

Purpose. This article aims to study and compare the physical and mechanical properties of nonwoven materials made of polylactic acid and polypropylene.

Methodology. Non-woven polymer materials made of polypropylene and polylactic acid were obtained by the method of aerodynamic spraying of melt on a receiving drum (melt-blown) on a laboratory installation. Physico-mechanical properties such as strength and elongation at break were evaluated using a P-5 tensile machine (according to ISO 5725-1). The rheological characteristics of the studied polymers were evaluated by measuring the melt flow index according to ISO 1133.

Findings. The possibility of manufacturing non-woven material from polylactic acid on equipment suitable for polypropylene processing has been experimentally confirmed. The parameters of fiber structure, elongation, and breaking strength were investigated. Polylactic acid non-woven material was found to have 7–30 times higher tensile strength and 7–10 times less elongation at break compared to polypropylene non-woven material in the investigated range of median fiber diameters.

Originality. The dependence of the physical and mechanical properties of non-woven materials on the average diameter of elementary fibers was established.

Practical value. The technological possibilities of using polylactic acid as a material for the production of non-woven filter materials have been established.

Keywords: polypropylene; polylactic acid; non-woven materials; physical and mechanical properties.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.10>

УДК 678.7:
661.1:615.4

¹ВАХІТОВ Р. А., ²КАЛАФАТ К. В., ²ТАРАН Н. А.,
^{1,2}БЕССАРАБОВ В. І., ²ВАХІТОВА Л. М.

¹ Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

² Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, Київ, Україна

ВИБІР ПОЛІМЕРІВ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ПРОМИСЛОВИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ РЕАКТИВНИХ ПОКРИТТЯХ

Мета. Дослідження впливу структури полімерів на вогнезахисну ефективність інтумесцентних систем поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит для створення конкурентоздатних промислових реактивних покриттів.

Методика. За модельну інтумесцентну систему обрано вогнезахисну суміш поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит/полімер. Як полімерну складову використовували вінілацетатні, акрилатні, стиролакрилатні водні дисперсії та розчини їх аналогів в органічних розчинниках. Об'ємний коефіцієнт спучення (K , см³/г) та масу коксового залишку (m , %) інтумесцентної композиції визначали після витримки зразків інтумесцентної системи при температурі 200–800 °С. Для ідентифікації продуктів термолізу інтумесцентних систем використано метод ІЧ-спектроскопії. Визначення вогнезахисної ефективності інтумесцентних покриттів проводили в міні-печі в умовах стандартної пожежі та за ДСТУ Б В.1.1-14:2007 і ДСТУ Б В.1.1-13:2007.

Результати. В дослідженні шляхом вивчення впливу природи полімерної складової надано практичні рекомендації, корисні для розробки рецептури інтумесцентного покриття з доведеною межею вогнестійкості до R150. Показано, що застосування різних полімерів для вогнезахисних покриттів є одним із шляхів диференційної розробки засобів вогнезахисту, орієнтованих на заданий клас вогнестійкості. Продемонстровано, що для забезпечення низької межі вогнестійкості (30 хв) доцільно застосовувати акрилатні інтумесцентні покриття, наприклад, полімер Hydro Pliolite 211 для водно-дисперсійних фарб, або суміші полімерів Pliolite AC80 та Pliolite AC4 для органорозчинних фарб. Для більш високих значень вогнестійкості (60 хв та вище) ефективними є інтумесцентні покриття вінілацетатного типу (вінілацетат-етилен, вінілацетат-етилен-вінілверсатат) на основі водно-дисперсійних полімерів марки Vinapas, Mowilith або аналогічних полімерних матеріалів від інших виробників.

Наукова новизна. Показано, що важливим фактором підвищення вогнезахисної ефективності інтумесцентних систем є використання полімерів конкретної структури, які мають багаступінчасте терморозкладання.

Практична значимість. Визначено оптимальні полімерні матеріали, які можуть бути застосовані при виробництві реактивних покриттів у промислових масштабах.

Ключові слова: вогнезахист; інтумесцентна система; поліфосфат амонію; меламін; пентаеритрит; меламін; вінілацетат; стиролакрилат.

Вступ. Застосування в будівництві сталевих та дерев'яних конструкцій і матеріалів можливо лише за умови, що вони забезпечують нормативний рівень пожежної безпеки та відповідають основним вимогам щодо збереження життя і здоров'я людей та рятувальників у разі виникнення пожежі [1, 2]. Основною стратегією підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій є оброблення засобами пасивного вогнезахисту для підвищення несучої здатності та цілісності [3, 4]. Інтумесцентні (реактивні) вогнезахисні системи (IFR) є найбільш вивченими в науковому плані, як у частині основних компонентів, так і допоміжних домішок, що збільшують вогнезахисну ефективність.

Відомо, що вогнезахисна інтумесцентна система складається з трьох основних складових, які мають усталені назви [3, 5, 6]:

- донор кислоти – зазвичай це сіль нелетучої неорганічної кислоти, наприклад, борної, сірчаної або фосфорної кислот, які виділяють кислоту при температурах вище 150 °С;

- карбонізуючий агент – вуглецева сполука з великою кількістю гідроксилів, яка зневоднюється під час реакцій етерифікації та карбонізації;

- газоутворювач – компонент, який під впливом тепла виділяє велику кількість негорючих речовин – газів, що утворюють піну з карбонізованого матеріалу на підкладці.

Цей набір компонентів IFR є коректним й може мати значні варіації щодо асортименту хімічних речовин [5, 7], якщо розглядати його як самостійну антипіренову суміш, основною функцією якої є зниження горючості полімерних, композитних чи інших матеріалів. Для випадків, коли IFR використовується у складі полімерного вогнезахисного покриття (IC), як четвертий невід’ємний компонент інтумесцентної системи слід розглядати полімер, що відіграє іноді критичну роль у значеннях вогнезахисної ефективності трійної системи донор кислоти/карбонізуючий агент/газоутворювач [8, 9–11]. Саме структура полімеру може бути відповідальною за забезпечення межі вогнестійкості сталевих конструкцій (R) вище 120 хв, підвищення стійкості до дії вологи та інших атмосферних факторів, підвищення екологічних характеристик вихідної інтумесцентної фарби та покриття протягом експлуатації. В той же час, інформація з наукових публікацій щодо залежності вогнезахисної ефективності реактивних покриттів від структури застосованого полімеру є несистематизованою та суперечливою [12–15].

Постановка завдання. Більшість наукових досліджень щодо впливу полімеру на інтумесцентний вогнезахист мають фундаментальну направленість щодо механізмів термічних перетворень, особливостей термічного розпаду полімерів у присутності компонентів інтумесцентної системи тощо [8, 10, 16]. Але отримані результати не дають прямих рекомендацій про прийнятність застосування того чи іншого полімеру для виробництва промислових засобів вогнезахисту. Тому дослідження з вибору оптимальних полімерів для інтумесцентних водних та органорозчинних композицій має конкретний практичний інтерес, пов’язаний як з виробництвом високоякісних вогнезахисних фарб, так і з мінімізацією витрат на вогнезахист конструкцій із металу та на сталеве будівництво у цілому.

Метою цього дослідження є вивчення впливу структури полімерів на вогнезахисну ефективність інтумесцентних систем поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит для створення конкурентоздатних промислових реактивних покриттів.

Матеріали та обладнання. У дослідженні використовували поліфосфат амонію (APP) II фази FR Cros 484 (Budenheim, Іспанія), Exolit AP 422 (Clariant, Німеччина), пентаеритрит (PE) мікронізований марки Charmor PM40 (Perstorp Holding AB, Швеція), меламін (MA) виробництва Borealis Agrolinz Melamine GmbH, Австрія, діоксид титану (TiO₂) марки Ti-Pure R-902 (DuPont, США). В табл. 1 наведено перелік полімерів, які були використані при виконанні експерименту.

Наноглини виробництва фірми BYK Additives & Instruments (Німеччина) представлені шаруватими силікатами Optigel WA (бентоніт Si₈Al₄O₂₀(OH)₄·nH₂O) та Garamite 7305 (модифікована бензалконієм суміш монтморилоніту – [M·nH₂O](Al_{4-x}Mg_x)Si₈O₂₀(OH)₄ і сепіоліту Mg₄(Si₆O₁₅)(OH)₂·6H₂O). Для удосконалення якісних характеристик інтумесцентних фарб використовували диспергатори, піногасники фірм BYK Additives & Instruments (Німеччина) та Troy Corporation (США), як біоцид для водно-дисперсійних композицій використовували Mergal K14 від Troy Corporation (США). Як загусники були досліджені ефіри целюлози Bermocoll EBM (Nouryon, Німеччина) та HEUR-загусники типу Rheolate від Elementis (США).

Приготування композицій, визначення об’ємного коефіцієнта спучення, K (см³/г), вогневі випробування за методом «пальника Бунзена», випробування у міні-печі в умовах «стандартної пожежі» здійснювали, як описано раніше [11].

Вогневі випробування інтумесцентних покриттів проводили згідно з процедурами, передбаченими ДСТУ В В.1.1-14:2007 (аналог EN 1365-4:1999) для колон та ДСТУ В В.1.1-13:2007 (аналог EN 1365-3:1999) для балок.

Результати дослідження. Для дослідження впливу полімеру на вогнезахисну ефективність інтумесцентного покриття було складено рецептури водних та органорозчинних композицій, які представлені у табл. 2. Як полімерна складова були використані полімери, які найбільш часто застосовуються в покриттях реактивного типу – співполімери вінілацетату, стирол-акрилату чи їх галогеновані похідні (табл. 1).

Таблиця 1

Перелік полімерних складових досліджених інтумесцентних систем

Хімічна структура співполімеру	Торгівельна назва	Скорочена назва	Розчинник	Виробник
Водні дисперсії полімеру				
Вінілацетат-етилен	Vinnapas® EZ 3010	EZ 3010	Вода	Wacker, США
Вінілацетат-етилен-вінілверсатат	Vinnapas® EZ 3112	EZ 3112	Вода	Wacker, США
Вінілацетат-етилен-вінілхлорид	Vinnapas® CEZ 3031	CEZ 3031	Вода	Wacker, США
Стирол-акрилат	Hydro Pliolite 211	H211	Вода	Omnova Solutions, США
Органорозчинні полімери				
Стирол-акрилат	Ньютонівський Pliolite AC80	AC80	Ксилол	Omnova Solutions, США
Стирол-акрилат	Неньютонівський Pliolite AC4	AC4	Ксилол	Omnova Solutions, США
Вінілхлорид-вінілацетат-вініловий спирт	VAH-N VAGH	VAGH	Ксилол/метилетилкетон	Dow UCAR, США
Вінілхлорид-вінілацетат	VYHH	VYHH	Ксилол/метилетилкетон	Dow UCAR, США

Вогнезахисна ефективність отриманих композицій була досліджена згідно з алгоритмом, що представлений на рис. 1: визначення коефіцієнту спучення (K_1) у термошафі при 340 °С; дослідження спучення в умовах пальника Бунзена; визначення межі вогнестійкості (R_1) та спучення (K_2) в міні-печі; проведення натурних вогневих випробувань за ДСТУ В В.1.1-14:2007 та ДСТУ В В.1.1-13:2007. (R_2), визначення лінійного коефіцієнту спучення (K_1).

Таблиця 2

Склад компонентів (%) в інтумесцентній фарбі

Тип композиції	Тип композиції	Тип композиції
Полімер	10 ¹⁾	10
APP	25	26
MA	8	10
PE	10	10
TiO ₂	12	9
Домішки ²⁾	5	5
Розчинник	30	30

¹⁾ Вміст чистого полімеру. ²⁾ Диспергатор, загущувач, піногасник.



Рис. 1. Алгоритм випробувань вогнезахисної ефективності у процесі розробки рецептури інтумесцентного покриття

В табл. 3 наведені результати цих досліджень для покриттів з товщиною $(1,50 \pm 0,15)$ мм. Для проведення натурних вогневих випробувань використовувались сталеві двотаврові колони зі зведеною товщиною 5,1 мм (section factor $A_m/V=196 \text{ м}^{-1}$) з чотиристороннім обігрівом.

Таблиця 3

Результати дослідження вогнезахисної ефективності інтумесцентних покриттів

№ IC	Полімер	$K_1, \text{см}^3/\text{г}$	$R_1, \text{хв}$	$K_2, \text{см}^3/\text{г}$	$R_2, \text{хв}$	$K_i^{1)}$	$T_d^{1)}$
Водно-дисперсійні фарби							
IC1	EZ 3010	42	35	38	56	42	249
IC2	EZ 3112	45	41	40	62	46	256
IC3	CEZ 3031	64	30	24	44	23	211
IC4	H211	35	28	18	35	21	231
Органорозчинні фарби							
IC5	AC80	40	23	15	32	5	207
IC6	AC80+AC4	43	36	25	48	34	229
IC7	VAGH	56	41	46	52	38	200
IC8	VYHH	62	37	26	44	30	208

¹⁾ Лінійний коефіцієнт спучення. ²⁾ Температура початку термодеградації полімеру, визначена TGA-методом.

Результати досліджень (табл. 3) свідчать, що структура полімеру критично впливає на досягнення кінцевого результату – забезпечення певної межі вогнестійкості сталевій конструкції (R_2 , хв). Так найкращий результат демонструє покриття IC2, що містить у своєму складі співполімер вінілацетат-етилен-вінілверсатат ($R_2 = 62$ хв), що майже у 2 рази перевищує значення R_2 для покриття IC5 на основі стирол-акрилатного сполучного (R_2 , табл. 3). Слід також зауважити, що випробування на пальнику Бунзена продемонстрували загальну тенденцію покриттів із стирол-акрилатним полімером IC4, IC5 до плавлення, стікання з металеві підкладки (рис. 2, а). Використання суміші ньютонівського співполімеру AC80 із неньютонівським AC4 у співвідношенні 3:1 децю долає цю проблему (рис. 2, б). Очевидно, що

для повного усунення стікання потребується додаткова модифікація складу ІС6 для підвищення в'язкості розплавленого шару перед його коксуванням.



Рис. 2. Стікання інтумесцентних покриттів при спалюванні на пальнику Бунзена:
а) ІС5; б) ІС6

Для визначення зміни коефіцієнта спучення K в інтервалі 200–800 °С було проведено поетапне вивчення морфології вуглецевого шару, як описано в експериментальній частині. На рис. 3 представлені залежності об'ємного коефіцієнта спучення (K) інтумесцентних композицій з різними полімерами (табл. 3) від температури.

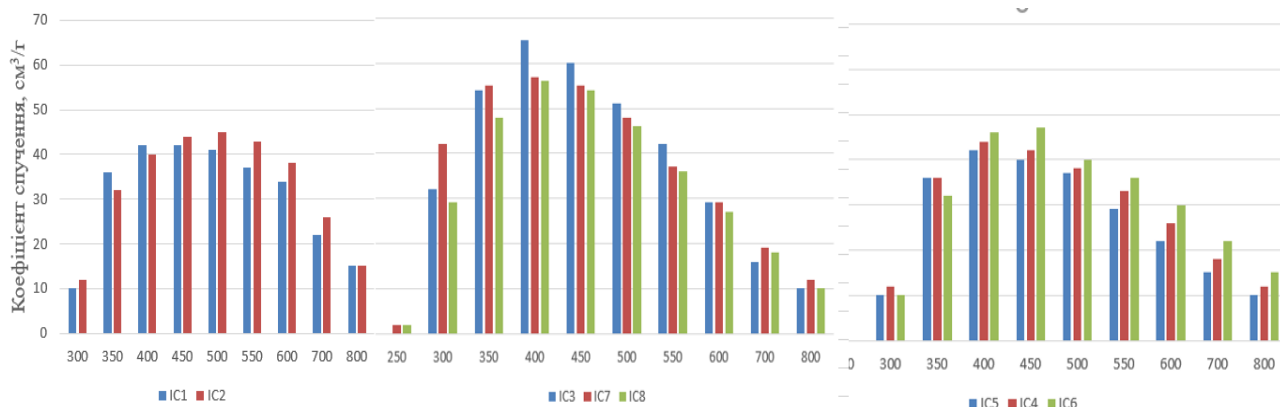


Рис. 3. Залежність коефіцієнта спучення K (см³/г) інтумесцентних композицій від температури T (°С)

За отриманими результатами (рис. 3) досліджені полімери логічно поділяються на три групи, що відрізняються перебігом процесу спучення, а відповідно й фізичними характеристиками побудованих вуглецевих шарів:

1) негалогеновані вінілацетатні співполімери, що утворюють ІС1 та ІС2. Згідно із зростанням вуглецевого каркасу (K , рис. 3) основні хімічні процеси в ІС1 та ІС2 починаються після 350 °С та перебігають в інтервалі температур 350–650 °С. Покриття ІС1 та ІС2 характеризуються тривалою стабілізаційною ділянкою сталості коефіцієнта спучення K (інтервал 350–650 °С, рис. 3);

2) галогеновані вінілацетатні співполімери, що містяться в композиціях ІС3, ІС7, ІС8. Ці покриття характеризуються більш раннім (< 300 °С) та стрімким спученням (K , рис. 3) зі скороченою ділянкою стабілізації K в інтервалі 350–550 °С;

3) стирол-акрилатні полімери в покриттях ІС4, ІС5, ІС6 також демонструють скорочення стабілізаційної ділянки коефіцієнта K до 550 °С.

Залежність коефіцієнта спучення K від температури (рис. 3) дозволяє позиціонувати негалогеновані вінілацетатні співполімери як найкращий вибір полімерної складової для ІС через утворення стабільних вуглецевих шарів, які розкладаються при більш високих температурах, ніж інші досліджені ІС (табл. 3). Було встановлено [11], що втрата 70 % маси для ІС з ароматичними співполімерами (ІС4 та ІС5) настає у середньому при 640 °С, в той час як ІС1 та ІС2 втрачають 70 % маси при температурі 701 °С та 715 °С відповідно.

Зовнішні вигляди коксових шарів для кожної означеної групи полімерів, що були отримані у процесі виконання експериментальних досліджень, представлені у табл. 4. Незалежно від умов випробувань у структурах коксового спученого шару досліджених композицій спостерігаються суттєві відмінності: регулярний, щільний і дрібнопористий каркас спостерігається при використанні в ІС негалогенованих вінілацетатних співполімерів EZ 3010 та EZ 3112. Ця тенденція зберігається й при проведенні повномасштабних вогневих випробувань – двотавр в кінці випробувань, як правило, є вкритим шільним та регулярним спученим шаром з відмінною адгезією до підкладки (рис. 4). Реактивні покриття, які використовуються у великомасштабних випробуваннях, містять додаткові антипірени та домішки до складів (см. табл. 2). ІС, які містять стирол-акрилатні полімери H211 та AC80, в свою чергу, формують більш легкі каркаси пористої структури, які є нестабільними після 600 °С. За результатами випробувань за ДСТУ В V.1.1-14:2007 після 40-50 хв спостерігається вигорання та руйнування захисного каркасу майже повністю для ІС5 та значні дефекти в покритті ІС6 (рис. 4). Коксові шари ІС з галогенованими вінілацетатними співполімерами характеризуються найбільшими коефіцієнтами спучення, але мають рихлу структуру з великими порожнинами. В умовах повномасштабних випробувань покриття, що містять галогеновані вінілацетатні співполімери (CEZ 3031, VAGH, VYHH) демонструють пухкі каркаси з локальними вигораннями та руйнуваннями (рис. 4).

Отримані результати є ще одним доказом того, що полімер в ІС слід розглядати не тільки як плівкоутворювач для отримання лакофарбового покриття й забезпечення йому певного строку експлуатації. Полімерна складова є четвертим повноцінним компонентом IFR, від якої, як показано вище, залежить показник межі вогнестійкості R – основна функціональна характеристика вогнезахисного інтумесцентного покриття.

Основною причиною різних показників межі вогнестійкості R є різниця в механізмах термічної деградації досліджених співполімерів. Відомо [17], що термодеструкція вінілацетатних полімерів здійснюється в два етапи: перший інтенсивний між 300 і 400 °С складається з процесу деацетилювання та відсіченням фрагментів в кінці полімерного ланцюга з утворенням полієнів; на другому етапі в інтервалі 400–500 °С відбувається деградація ланцюга за подвійним зв'язками. У разі стирол-акрилатних полімерів термодеструкція відбувається за один основний крок від 340 до 450 °С з одночасним відщепленням фрагментів акрилової кислоти, їх декарбоксилюванням та розщепленням ланцюга безпосередньо в летючі мономери [18]. При використанні галогенованих вінілацетатних співполімерів передбачуваним є посилене виділення оцтової кислоти за рахунок кислотного каталізу з боку утвореного HCl. Це провокує зниження температури розпаду полімеру та насичує IFR леткими речовинами, що призводять до надмірного спучення та руйнування вуглецевого каркасу.

Для подальшого вибору оптимальних для інтумесцентного вогнезахисту полімерних складових слід однозначно виключити галогенові полімери, як джерело край шкідливих речовин в умовах пожежі. Що стосується стирол-акрилатних органорозчинних полімерів, то слід зазначити, що на світовому ринку полімерів край важко знайти аналогічні бюджетні замінники, які здатні утворювати висококонцентровані (до 30%) лакові напівпродукти для отримання високонаповнених (до 80% нелетких речовин) інтумесцентних фарб низького цінового сегменту.

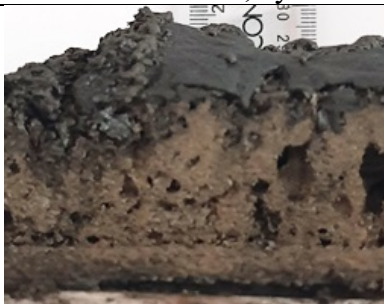
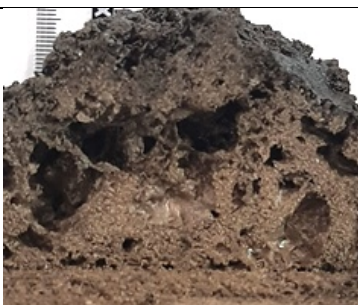
Витримка у термошафі	Випробування у міні-печі	Випробування за DSTU В V.1.1-14:2007
IC2, Вінілацетат-стилен-вінілверсатат		
		
IC5, ньютонівський стирол-акрилат		
		
IC6, суміш ньютонівський+неньютонівський стирол-акрилати		
		
IC8, вінілхлорид-вінілацетат		
		

Рис. 4. Вигляд вуглецевих шарів в різних умовах випробувань

Дані, що представлені нижче, стосуються визначення області застосування ароматичних стирол-акрилатних співполімерів у вогнезахисних ІС. В табл. 4 наведено результати натурних вогневих випробувань за ДСТУ В V.1.1-13:2007 покриттів IC1 та IC6 з варіацією товщини. Залежно від товщини шару вінілацетатного (EZ 3010) та стирол-акрилатного (суміш AC80+AC4) покриття спостерігається реверс вогнезахисної ефективності: значення межі вогнестійкості R_2 сталевих балок, з покриттям IC1 з товщиною 0,45 мм, складає 22 хв, що значно менше аналогічної величини для покриття IC6 такої ж товщини (34 хв). В той

час як значення вогнестійкості для покриття IC6 з товщиною 1,95 мм складає 44 хв, а для покриття IC2 – 56 хв. Візуалізація цього експерименту показана на рис. 5.

Таблиця 4

Межа вогнестійкості сталевих балок, захищених інтумесцентними покриттями IC1 та IC6 з різною товщиною

IC	IC1		IC6	
Товщина покриття, мм	0,45±0,04	1,92±0,11	0,44±0,05	1,95±0,13
Межа вогнестійкості, R ₂ , хв	22	56	34	42



Рис. 5. Випробування двотаврових балок, захищених покриттями IC1 та IC6 з різними товщинами за DSTU B V.1.1-13:2007: а) до випробувань; б) після випробувань в умовах стандартної пожежі протягом 60 хв

Таким чином показано, що застосування різних полімерів для вогнезахисних покриттів є одним із шляхів диференційної розробки засобів вогнезахисту, орієнтованих на заданий клас вогнестійкості. Продемонстровано, що для забезпечення низької межі вогнестійкості (30 хв) доцільно застосовувати акрилатні інтумесцентні покриття що містять, наприклад, полімер H211 (Hydro Pliolite 211) для водно-дисперсійних фарб, або суміш полімерів AC80+AC4 (Pliolite) для органорозчинних фарб. В свою чергу, для більш високих значень вогнестійкості (60 хв та вище) ефективними є інтумесцентні покриття вінілацетатного типу на основі водно-дисперсійних полімерів марки EZ 3010 чи EZ 3112 або аналогічних полімерних матеріалів від інших виробників. Досліджені полімерні сполучні є продуктами, які промислово виробляються під різними торговими марками. Вони є відносно бюджетними матеріалами й не роблять критичного внеску у собівартість засобів реактивного вогнезахисту, тому можуть бути рекомендовані для рецептур вогнезахисних покриттів.

Висновки. Досліджено вплив структури вінілацетатних та стирол-акрилатних полімерів на вогнезахисну ефективність інтумесцентних систем поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит для створення реактивних покриттів інтумесцентного типу.

Показано, що використання різних полімерних зв'язуючих є одним із шляхів диференційованої розробки вогнезахисних реактивних покриттів із заданим показником вогнестійкості. Доведено, що високу вогнезахисну ефективність інтумесцентного засобу вогнезахисту (R60 та вище) можна досягти при використанні полімерів вінілацетатного типу (вінілацетат-етилен, вінілацетат-етилен-вінілверсатат). Результати дослідження були підтверджені натурними вогневими випробуваннями згідно з національними стандартами та є практичними рекомендаціями для створення нових конкурентоспроможних покриттів з підвищеними вогнезахисними властивостями.

References

1. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC Text with EEA relevance. *OJEU*. 2011. 39 p.
2. Nguyen, M. H., Ouldboukhithine, S.-E., Durif, S., Saulnier, V., Bouchair, A. (2023). Passive fire protection of steel profiles using wood. *Eng. Struct.*, 275, Part A, 115274.
3. Lucherini, A., Maluk, C. (2019). Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *J. Constr. Steel Res.*, 162 (9), 105712.
4. Wang, K., Le, H. (2023). The Development of Cement-Based, Intumescent and Geopolymer Fire-Retardation Coatings for Metal Structures: A Review. *Coatings*, 13, 495.
5. Mariappan, T. (2016). Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *J. Fire Sci.*, 34(2), 1–44.
6. Vakhitova, L. N. (2019). Fire retardant nanocoating for wood protection. In: *Nanotechnology in Eco-efficient Construction*. P. 361–391.
7. Yasir, M., Ahmad, F., Yusoff, P. S. M. M., Ullah, S., Jimenez, M. (2019). Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review. *Surf. Eng.*, 36, 334–363.
8. Bourbigot, S., Sarazin, J., Samyn, F., Jimenez, M. (2019). Intumescent ethylene-vinyl acetate copolymer: reaction to fire and mechanistic aspects. *Polym. Degrad. Stab.*, 161, 235–244.
9. Ng, Y. H., Dasari, A., Tan, K. H., Qian, L. (2021). Intumescent fire-retardant acrylic coatings: Effects of additive loading ratio and scale of test. *Prog. Org. Coat.*, 150, 105985.
10. Pimenta, J. T., Gonçalves, C., Hiliou, L., Coelho, J. F. J., Magalhaes, F. D. (2015). Effect of binder on performance of intumescent coatings. *J. Coat. Technol. Res.*, 13, 227–238.
11. Kalafat, K., Taran, N., Plavan, V., Bessarabov, V., Zagoriy, G., Vakhitova, L. (2020). Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, 4 (10), 45–54.
12. Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., Drizhd, V., Taran, N., Bessarabov, V. (2023). Nano-clays as rheology modifiers in intumescent coatings for steel building structures. *Chemical Engineering Journal Advances*, 100544.

Література

1. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC Text with EEA relevance. *OJEU*. 2011. 39 p.
2. Nguyen M. H., Ouldboukhithine S.-E., Durif S., Saulnier V., Bouchair A. Passive fire protection of steel profiles using wood. *Eng. Struct.* 2023. Vol. 275. Part A. 115274.
3. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *J. Constr. Steel Res.* 2019. Vol. 162 (9). 105712.
4. Wang K., Le H. The Development of cement-based, intumescent and geopolymer fire-retardation coatings for metal structures: a review. *Coatings* 2023. № 13. 495.
5. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *J. Fire Sci.* 2016. Vol. 34 (2). P. 1–44.
6. Vakhitova L. N. Fire retardant nanocoating for wood protection. In: *Nanotechnology in Eco-efficient Construction*. 2019. P. 361–391.
7. Yasir M., Ahmad F., Yusoff P. S. M. M., Ullah S., Jimenez M. Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review. *Surf. Eng.* 2019. Vol. 36 (4). P. 334–363.
8. Bourbigot S., Sarazin J., Samyn F., Jimenez M. Intumescent ethylene-vinyl acetate copolymer: Reaction to fire and mechanistic aspects. *Polym. Degrad. Stab.* 2019. Vol. 161. P. 235–244.
9. Ng Y. H., Dasari A., Tan K. H., Qian L. Intumescent fire-retardant acrylic coatings: Effects of additive loading ratio and scale of test. *Prog. Org. Coat.* 2021. Vol. 150. 105985.
10. Pimenta J. T., Gonçalves C., Hiliou L., Coelho J. F. J., Magalhaes F. D. Effect of binder on performance of intumescent coatings. *J. Coat. Technol. Res.* 2015. № 13. P. 227–238.
11. Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 2020. № 4 (10). P. 45–54.
12. Vakhitova L., Kalafat K., Vakhitov R., Drizhd V., Taran N., Bessarabov V. Nano-clays as rheology modifiers in intumescent coatings for steel building structures. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023. 100544.

13. Zeng, Y., Weinell, C. E., Dam-Johansen, K., Ring, L., Kiil, S. (2020). Effects of coating ingredients on the thermal properties and morphological structures of hydrocarbon intumescent coating chars. *Prog. Org. Coat.*, 143, 105626.
14. Puri, R. G., Khanna, A. S. (2016). Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(1), 1–20.
15. Anees, S. M., Dasari, A. (2018). A review on the environmental durability of intumescent coatings for steels. *Journal of Materials Science*, 53(3), 124–145.
16. Troitzsch, J. H. (2023). Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 12–24.
17. Pielichowski, K., Njuguna, J., Majka, T. M. (2022). Thermal Degradation of Polymeric Materials. 2nd Ed. Elsevier Science. 378 p.
18. Kalafat, K. V., Taran, N. A., Plavan, V. P., Redko, A. M., Efimova, I. V., Vakhitova, L. M. (2020). The effect of ammonium polyphosphate: melamine: pentaerythritol ratio on the efficiency of fire protection of reactive coatings. *Vopr. Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6, 59–68.
13. Zeng Y., Weinell C. E., Dam-Johansen K., Ring L., Kiil S. Effects of coating ingredients on the thermal properties and morphological structures of hydrocarbon intumescent coating chars. *Prog. Org. Coat.* 2020. Vol. 143. 105626.
14. Puri R. G., Khanna A. S. Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2016. Vol. 14 (1). P. 1–20.
15. Anees S. M., Dasari A. A review on the environmental durability of intumescent coatings for steels. *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53 (3). P. 124–145.
16. Troitzsch J. H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2023. P. 12–24.
17. Pielichowski K., Njuguna J., Majka T. M. Thermal Degradation of Polymeric Materials. 2nd Ed. Elsevier Science, 2022. 378 p.
18. Kalafat K. V., Taran N. A., Plavan V. P., Redko A. M., Efimova I. V., Vakhitova L. M. The effect of ammonium polyphosphate: melamine: pentaerythritol ratio on the efficiency of fire protection of reactive coatings. *Vopr. Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2020. № 6. P. 59–68.

VAKHITOV RAMIL

Postgraduate, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-9657-5743>
Scopus Author ID: 58183912100
Researcher ID: rid30607
E-mail: vahitov89@gmail.com

TARAN NADIYA

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Department of Nucleophilic Reactions Research, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-1043-5596>
Scopus Author ID: 15119449100
E-mail: N.A.Taran@nas.gov.ua

KALAFAT KOSTIANTIN

Doctor of Philosophy in Chemical and Bioengineering, Research Associate, Department of Nucleophilic Reactions Research, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0001-6165-0005>
Scopus Author ID: 5719302971
E-mail: kalafat@nas.gov.ua

BESSARABOV VOLODYMYR

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Industrial Pharmacy Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-0637-1729>
Scopus Author ID: 36917184700
Researcher ID: D-3425-2017;
E-mail: v.bessarabov@kyivpharma.eu

VAKHITOVA LIUBOV

Candidate of Chemical Sciences, Senior Research Fellow, Department of Nucleophilic Reactions Research, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1923-7895>
Scopus Author ID: 8443383300
Researcher ID: J-9402-2016
E-mail: L.M.Vakhitova@nas.gov.ua

¹VAKHITOV R. A., ²KALAFAT K. V., ²TARAN N. A.,
^{1,2}BESSARABOV V. I., ²VAKHITOVA L. M.

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

² L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

POLYMERS FOR APPLICATION IN INDUSTRIAL FIRE RETARDANT REACTIVE COATINGS

Purpose. To investigate the effect of polymer structure on the fire retardant efficiency of intumescent systems based on ammonium polyphosphate/melamine/pentaerythritol for the development of competitive industrial reactive coatings.

Methodology. A fire retardant mixture of ammonium polyphosphate/melamine/pentaerythritol/polymer was chosen as a model intumescent system. Vinyl acetate, acrylic, and styrene-acrylic aqueous dispersions, as well as solutions of their analogs in organic solvents, were used as polymer components. The volumetric intumescent coefficient (K , cm³/g) and mass of char residue (m , %) of the intumescent composition were determined after exposing samples of the intumescent system to temperatures ranging from 200 to 800 °C. Infrared spectroscopy was employed to identify the thermal decomposition products of intumescent systems. Fire retardant efficiency of intumescent coatings was assessed using a mini-furnace under standard fire conditions, according to DSTU B V.1.1-14:2007 and DSTU B V.1.1-13:2007.

Findings. The study provides practical recommendations for the development of intumescent coatings with a proven fire resistance limit of R150 by examining the influence of the polymer component nature. It has been demonstrated that the use of different polymers for fire retardant coatings is a method for differentially developing fire protection means focused on a given fire resistance class. It has been demonstrated that to ensure a low fire resistance limit (30 min), it is advisable to use acrylate intumescent coatings, for example, Hydro Pliolite 211 polymer for waterborne paints, or mixtures of Pliolite AC80 and Pliolite AC4 polymers for organosoluble paints. For higher fire resistance values (60 minutes and above), vinyl acetate-type intumescent coatings (vinyl acetate-ethylene, vinyl acetate-ethylene-vinyl versatate) based on aqueous dispersions of polymers such as Vinapas, Mowilith, or similar materials from other manufacturers prove effective.

Originality. It is shown that an important factor in improving the fire protection efficiency of intumescent systems is the use of polymers of a specific structure with multistage thermal decomposition.

Practical value. Optimal polymer materials applicable for the production of reactive coatings on an industrial scale have been identified.

Keywords: fire protection; intumescent system; ammonium polyphosphate; melamine; pentaerythritol; vinyl acetate; styrene-acrylic.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.11>

УДК 54.05

МАКЄЄВА І. С., КИСЛОВА О. В., ПАТЛУН Д. В.,
ХОМЕНКО В. Г., НІКУЛІН Д.О.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ХІМІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ПРИРОДНОГО ГРАФІТУ

Мета. Аналіз ефективності хімічного очищення зразків природного графіту за допомогою мінеральних кислот та їх сумішей з додаванням амоній фториду.

Методика. Очищення природних зразків графіту здійснювали шляхом їх обробки розчинами нітратної або сульфатної кислот з додаванням амоній фториду. Рівень очищення графіту визначали методом озолення його наважки в муфельній печі до постійної маси при температурі 1050 °С. Хімічний склад домішок у зразках графіту встановлено за допомогою рентгено-флуоресцентного аналізу з використанням спектрометра Oxford Instruments X-Supreme 8000 (Великобританія).

Результати. Було апробовано кілька методів хімічного очищення графітових матеріалів, зокрема марок GAK-2 та GUPG-92 за допомогою мінеральних кислот різного складу. Проведено аналіз графітових зразків до та після хімічного очищення. Встановлено, що запропонований метод очистки розчином $H_2SO_4 + NH_4F$ дозволяє одержати графіт чистотою 99,97% для марки GAK-2 за одну стадію обробки та 99,44% для марки GUPG-92 за дві стадії обробки.

Наукова новизна. Результати рентгено-флуоресцентного та гравіметричного аналізу очищеного графіту підтверджують високу ефективність запропонованого методу кислотної обробки в присутності добавки амоній фториду для очищення вибраних зразків. Вперше ефективне очищення графіту було виконано за допомогою розбавлених розчинів кислот.

Практична значимість. Хімічно очищений графіт має ключове значення для розвитку технологій промислового виробництва сировини для літій-іонних акумуляторів та новітніх матеріалів, таких як графен. Розробка ефективних методів хімічної очистки сприяє зниженню витрат при отриманні графіту високої чистоти.

Ключові слова: графіт; хімічна очистка; зольність; мінеральні кислоти; амоній фторид.

Вступ. Завдяки високій електропровідності, пластичності та механічній міцності графіт використовується в різних галузях промисловості, зокрема для виготовлення акумуляторних батарей, мастильних матеріалів, графіто-керамічних виробів, у ливарній справі, атомній енергетиці та аерокосмічній галузі. Це сприяє значному зростанню попиту на графіт та обсягів його виробництва [1].

Україна має чотири графітоносні райони, проте основна переробка графітових руд здійснюється переважно на Заваллівському графітовому комбінаті. Випускається широкий асортимент марок графіту для різних галузей промисловості (тигельний, елементний, ливарний, електровугільний, акумуляторний та ін.). Основною сировиною є велико-лускатий графіт з високо-впорядкованою структурою. Його добувають з руди, що представляє собою каолінізовані гнейси, які містять біотит, хлорит, гранат, піроксен, кварц, силіманіт. Вміст графіту в руді знаходиться в межах 5–7%. Він представлений великими лусками, об'єднаними в голки та стрічки розміром 4–6 мм, які тісно зрощені між собою та з іншими мінералами. Збагачення руд здійснюється флотацією та хімічними методами. В результаті отримують промисловий концентрат з вмістом високоякісного графіту до 90–99% для різних марок [2].

Великі обсяги малозольного графіту необхідні для виготовлення акумуляторів електромобілів. Для матеріалу анода можна використовувати як природний, так і синтетичний графіт, який повинен бути очищений до рівня, де вміст основної речовини перевищує 99,95%. Наразі не існує економічно вигідної альтернативи цьому матеріалу. У порівнянні з синтетичним графітом, природний лускатий графіт має більш впорядковану кристалічну

структуру, вищі показники електро- та теплопровідності, що сприяє зниженню вартості літій-іонних акумуляторів [3].

Постановка завдання. Основним завданням даного дослідження було удосконалення методів хімічного доочищення промислових зразків графіту GAK-2 та GUPG-92 з Заваллівського родовища для отримання малозольного графіту високої якості.

Результати дослідження. Процес збагачення графітової руди включає ряд послідовних операцій [4]:

- подрібнення руди в щічних та конусних подрібнювачах;
- помел подрібненої руди мокрим способом в кульових млинах до отримання частинок розміром до 74 мкм, що становлять 50–60% об'єму;
- флотація з шістьма перемішувачами;
- сушіння в сушильному барабані;
- хімічне збагачення графітового концентрату;
- кінцеве подрібнення продукту в агрегатах для помелу.

Основними напрямками доочистки збагаченого природного графіту є термічне випалювання, газотермічне рафінування та хімічна обробка [5].

Термічне очищення графіту полягає в випалюванні забруднень та домішок графіту при високих температурах (2500–3000 °C) без доступу повітря, тоді як газотермічне рафінування графіту відбувається під впливом високих температур у спеціальній атмосфері газів (аргон, водень або метан). Обидва методи є енергоємними, потребують значних капіталовкладень та мають досить складне виробництво [4, 5].

Методи хімічної очистки включають обробку графіту сумішшю мінеральних кислот (плавиковою кислотою або фторвмісними солями в комбінації з сульфатною або нітратною кислотами) або спікання з лугом з подальшим промиванням водою. Для отримання графітів високого ступеня чистоти застосовують комбіновані методи та багатоступінчасте очищення. Проте вартість хімічно очищеного графіту значно нижча вартості графіту, очищеного за високих температур [6, 7].

На Заваллівському графітовому комбінаті виробляють широкий асортимент марок кристалічного графіту. Для тестування у цій роботі були обрані зразки двох марок: GAK-2 та GUPG-92.

Графіт GAK-2 з вмістом вуглецю понад 99% застосовується як добавка для виготовлення активних мас лужних акумуляторів та мас для графітованих антифрикційних виробів із кольорових металів. Графіт марки GUPG-92, який містить 92% вуглецю, використовується для виготовлення ливарних покриттів, мастил, у порошковій металургії [2].

Виготовлення сучасних акумуляторів потребує високого ступеня очистки графіту з вмістом вуглецю понад 99,95%. З метою одержання високоочищеного графіту, придатного для використання у виробництві літій-іонних акумуляторів, була досліджена можливість доочищення графітів марок GUPG-92 та GAK-2. Вибір марки графіту GUPG-92 був обумовлений його низькою вартістю у порівнянні з GAK-2.

Загальна характеристика досліджуваних зразків графіту щодо ступеня їх чистоти та розміру частинок наведена нижче (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика марок графіту

Марка	Вміст вуглецю, %	Зольність, %	Гранулометричний склад, %		
			+300 мкм	+150 мкм	+75 мкм
GUPG-92	92,67	7,33	22	98	99
GAK-2	99,19	0,81	-	15	60

Як свідчать наведені в табл. 1 дані, графіт марки GAK-2 є дрібнодисперсним і має достатньо високий ступінь чистоти, тоді як графіт марки GUPG-92 потребує ретельного доочищення. Для досягнення рівня чистоти понад 99,95% була проведена хімічна доочистка обох марок графіту.

Обрана хімічна технологія очистки базується на здатності кислот розчиняти значну кількість мінеральних домішок, присутніх в графіті [8]. Кислотну обробку зразків графіту проводили з використанням розведених розчинів мінеральних кислот з масовою часткою 20%: нітратної кислоти, а також розчинів нітратної або сульфатної кислот з додаванням амоній фториду ($\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{F}$ або $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{F}$ відповідно).

Ефективність очистки зразків оцінювали за їх зольністю, яку визначали шляхом озолення наважки графіту в муфельній печі до постійної маси при температурі 1050 °C.

Зольність зразку графіту (X) у відсотках розраховували за формулою (1):

$$X = \frac{m}{M} \cdot 100, \quad (1)$$

де m – маса зольного залишку;
 M – маса наважки графіту.

В табл. 2 наведено величину зольності зразків графіту після хімічної обробки різними сумішами.

Таблиця 2

Оцінка ефективності очистки графітів

Марка графіту	Метод очистки	Вуглець, %	Зольність, %
GUPG-92	HNO_3	94,20	5,80
	$\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{F}$	99,01	0,99
	$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{F}$	98,97	1,03
GAK-2	HNO_3	99,78	0,22
	$\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{F}$	99,97	0,03
	$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{F}$	99,98	0,02

Процес хімічної очистки полягає в розчиненні неорганічних домішок на поверхні частинок графіту при їх взаємодії з кислотами. Хімічне очищення графіту відбувається на межі твердої та рідкої фаз, тому цей процес можна розглядати як гетерогенну реакцію.

Хімічна обробка графітових концентратів нітратною кислотою призводить до незначного зниження зольності: з 7,33 до 5,8% та з 0,81 до 0,22% для графітів марок GUPG-92 та GAK-2 відповідно. Це зумовлено високою хімічною стійкістю залишків біотит-гранатових гнейсів та інших сульфідних і оксидних мінералів на поверхні графіту. З метою руйнування структури мінералів та їх подальшого розчинення в мінеральних кислотах в роботі запропоновано використання добавки амоній фториду.

Застосування нітратної або сульфатної кислот з амоній фторидом дозволяє значно зменшити вміст золи в графітах, приблизно до 1% для графіту марки GUPG-92 та 0,02% для GAK-2. Досягнення чистоти 99,98% для графіту GAK-2 з початковою зольністю 0,81% можливо за один цикл кислотної обробки.

Графіт марки GUPG-92 з початковою золою 7,33% за один цикл хімічної обробки очистили до вмісту вуглецю біля 99%. Другий цикл хімічної обробки було проведено сумішшю сульфатної кислоти з амоній фторидом з нижчими концентраціями компонентів. Ступінь очищення збільшився до 99,44%, проте потрібного рівня очистки досягти не вдалось.

Застосування рентгено-флуоресцентного аналізу дозволило проаналізувати якісний та кількісний склад досліджуваних зразків графіту до та після хімічної обробки (рис. 1 та табл. 3 та 4).

Згідно з рис. 1 зольні залишки обох промислових зразків графіту переважно містили високу концентрацію заліза. Графіт марки GUPG-92 також містить високі концентрації таких елементів, як Al, Si, K, Ca, Ti, Mn, які є складовими біотит-гранатових гнейсів та інших сульфідних і оксидних мінералів. У зразку GAK-2, який додатково очищується виробником, кількість цих елементів є значно меншою. Проте спостерігається висока інтенсивність сигналів таких елементів, як Cr та Ni. Вони, як правило, містяться у нержавіючій сталі, з якої виготовляється хімічне обладнання. Тому збільшення концентрації Cr та Ni у графіті марки GAK-2, ймовірно, є наслідком хімічного очищення виробником.

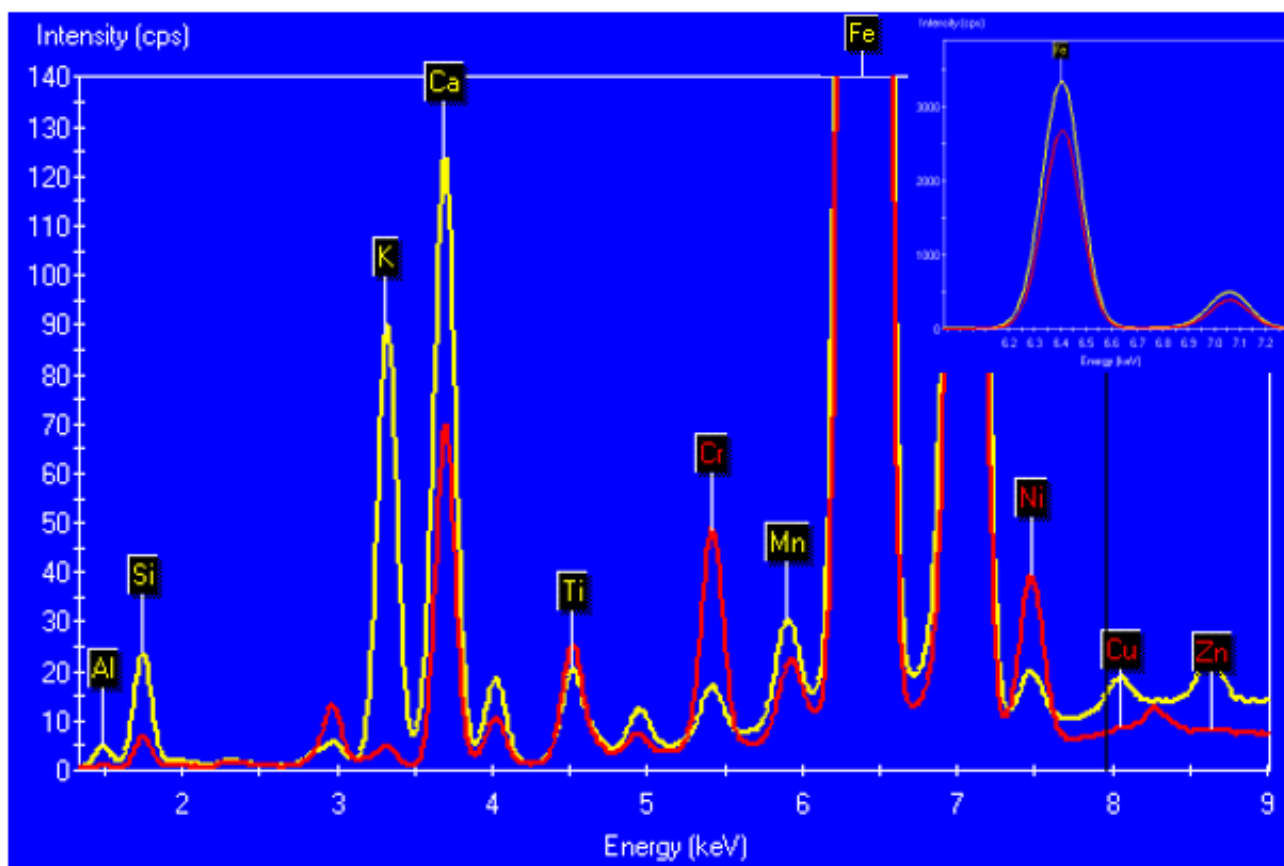


Рис. 1. РФА спектри зольних залишків зразків графіту марки GUPG-92 (жовта лінія) та GAK-2 (червона лінія) до очищення

В результаті хімічної очистки графіту марки GAK-2 вміст всіх елементів вдалося суттєво зменшити (табл. 3). Ефективність обробки нітратною кислотою була значно нижчою, ніж обробка сумішшю нітратної або сульфатної кислоти із амоній фторидом. Застосування розчину $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{F}$ найбільш ефективно зменшувало вміст майже всіх елементів.

Графіт марки GUPG-92 містить значно вищі концентрації домішок різних хімічних елементів, зокрема Fe, Si, Al, K, Ca. При обробці нітратною кислотою не вдалося розчинити сполуки Mg, Al, Si. Додавання NH_4F до розчину нітратної або сульфатної кислот суттєво знизило концентрацію всіх домішок (табл. 4). Проте концентрації Fe та Si залишаються високими (понад 1000 мг/кг). Варто відмітити, що вміст заліза в графіті для літій-іонних акумуляторів повинен бути меншим 50 мг/кг.

Таблиця 3

Хімічний аналіз зразків графіту GAK-2 до та після очистки, ppm (мг/кг)

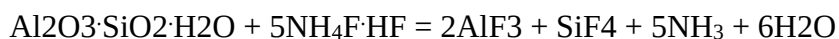
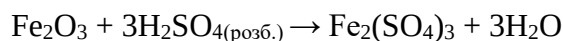
Елемент	До очищення	Після очищення		
		HNO ₃	HNO ₃ + NH ₄ F	H ₂ SO ₄ + NH ₄ F
Na	49	40,3	13,9	14,9
Mg	4	<0,1	<0,1	<0,1
Al	77	37	8,9	5,8
Si	385	380	65,4	44,5
Cl	50	15,9	22,2	17,2
K	7	9,2	0,8	0,5
Ca	73	16,7	5,0	3,0
Ti	41	11,6	1,5	0,7
V	2	<0,1	<0,1	<0,1
Cr	51	49,0	11,0	6,6
Mn	16	5,0	0,4	0,3
Fe	4269	684,8	42,7	20,0
Co	49	<0,1	<0,1	<0,1
Ni	77	62,3	9,0	8,4
Cu	4	13	0,4	<0,1
Zn	4	4	1,9	1,1

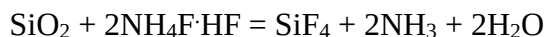
Таблиця 4

Хімічний аналіз зразків графіту GUPG-92 до та після очистки, ppm (мг/кг)

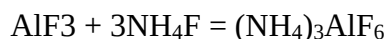
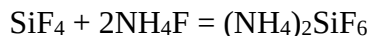
Елемент	До очищення	HNO ₃	HNO ₃ + NH ₄ F	H ₂ SO ₄ + NH ₄ F
Na	641	<0,1	6	<0,1
Mg	62	55,7	8,5	5,6
Al	2748	2643,4	396,6	332,4
Si	6349	6299	1878,8	3336,2
Cl	778	<0,1	<0,1	<0,1
K	1099	917,7	97,9	71,9
Ca	1397	213,7	32,4	38,8
Ti	208	201,4	125,3	167,5
V	41	19,6	4,2	5,7
Cr	56	27,0	12,2	8,3
Mn	178	46,2	10,5	6,7
Fe	29705	17872,7	3259,3	1430,0
Co	380	0,5	0,1	0,1
Ni	93	<0,1	26	13,9
Cu	119	<0,1	<0,1	<0,1
Zn	238	154,2	6,0	5,3

Ефективність добавки NH₄F при хімічному очищенні графіту можна пояснити так: розбавлена сульфатна кислота активно реагує зі сполуками заліза, тоді як присутність NH₄F ефективно видаляє сполуки на основі кремнію та алюмінію. Ці процеси можна описати наступними хімічними реакціями [9]:





При надлишку амоній фториду відбувається утворення розчинних комплексних сполук:



Розчинні сполуки, що утворюються в результаті дії кислот з амоній фторидом ефективно були видалені при подальшому промиванні графіту.

Висновки. В рамках даного дослідження було розроблено та апробовано методики хімічного доочищення природних графітів, які були попередньо збагачені та очищені на Заваллівському графітовому комбінаті. Експериментальне визначення зольності та аналіз вмісту критично важливих домішок за допомогою рентгено-флуоресцентного методу в зразках дозволили оцінити ефективність різних методів хімічної очистки. Особлива увага приділялася використанню мінеральних кислот у поєднанні з амоній фторидом для досягнення вищих показників чистоти графіту. Аналіз результатів показав, що оптимальні результати були досягнуті застосуванням суміші сульфатної кислоти з амонію фторидом. Зокрема, обробка графіту марки GAK-2 цією сумішшю дозволила знизити зольність до 0,02%, що свідчить про зниження загальної кількості домішок в 40 разів порівняно з вихідним станом. В той же час, графіт марки GUPG-92 із початковим вмістом золи 7,33% було очищено до рівня чистоти 98,97% у першому циклі та до 99,44% у другому циклі обробки. Однак для подальшого використання в промисловості такий рівень чистоти є недостатнім, що вказує на необхідність вдосконалення розробленої методики хімічного очищення зразків графіту з високим вмістом домішок (понад 5%).

References

1. Jara, A., Betemariam, A., Woldetinsae, G., Kim, J. (2019). Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29, 671–689. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.04.003>.
2. Rodovyshcha hrafitu v Ukraini: zabezpechenist ta perspektyvy [Graphite deposits in Ukraine: availability and prospects]. *Bloh kompanii GeoGroup = GeoGroup company blog*. URL: https://geogroup.com.ua/blog/rodovyshha-grafitu-v-ukrayini-zabezpechenist-ta-perspektyvy/gad_source [in Ukrainian].
3. Chehreh Chelgani, S., Rudolph, M., Kratzsch, R., Sandmann, D., Gutzmer, J. (2016). A Review of Graphite Beneficiation Techniques. *Mineral Proces. and Extractive Metallurgy*, 37:1, P. 58–68. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115992>.
4. Six Methods of Beneficiation of graphite ore. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/6-methods-beneficiation-graphite-ore-xinhaimining>.
5. High temperature method for purification of natural graphite. URL: <https://www.cfccarbon.com/news/graphite-purification-high-temperature-method.html>.

Література

1. Jara A., Betemariam A., Woldetinsae G., Kim J. Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29, P. 671–689. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.04.003>.
2. Родовища графіту в Україні: забезпеченість та перспективи. *Блог компанії GeoGroup*. URL: https://geogroup.com.ua/blog/rodovyshha-grafitu-v-ukrayini-zabezpechenist-ta-perspektyvy/gad_source.
3. Chehreh Chelgani S., Rudolph M., Kratzsch R., Sandmann D., Gutzmer J. A Review of Graphite Beneficiation Techniques. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2016. No. 37 (1). P. 58–68. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115992>.
4. Six Methods of Beneficiation of graphite ore. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/6-methods-beneficiation-graphite-ore-xinhaimining>.
5. High temperature method for purification of natural graphite. URL: <https://www.cfccarbon.com/news/graphite-purification-high-temperature-method.html>.

6. Bao, C., Shi, K., Xu, P., Yang, L., Chen, H., Dai, Y., Liu, H. (2021). Purification effect of the methods used for the preparation of the ultra-high purity graphite. *Diamond and Related Materials*, 120, 108704, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108704>.

7. Jara, A., Kim, J. (2020). Chemical purification processes of the natural crystalline flake graphite for Li-ion Battery anodes. *Materials Today Communications*, 25, 101437, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101437>.

8. Kuang, J. C., Xu, H., Xie, W., Peng, S. (2013). Investigation of purification technology for aphanitic graphite by ammonium fluoride and hydrochloric acid. *Materials Science*, 27, 9–12. URL: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201402291759188841.

9. Hak Jun Oh (2022). Purification of Graphite Concentrate by Leaching with Phosphorus Chemistry. Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, Montreal. 150 p.

6. Bao C., Shi K., Xu P., Yang L., Chen H., Dai Y., Liu H. Purification effect of the methods used for the preparation of the ultra-high purity graphite. *Diamond and Related Materials*. 2021. Vol. 120. Art. 108704. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108704>.

7. Jara A., Kim J. Chemical purification processes of the natural crystalline flake graphite for Li-ion Battery anodes. *Materials Today Communications*. 2020. Vol. 25. Art. 101437. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101437>.

8. Kuang J. C., Xu H., Xie W., Peng S. Investigation of purification technology for aphanitic graphite by ammonium fluoride and hydrochloric acid. *Materials Science*. 2013. Vol. 27. P. 9–12. URL: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201402291759188841.

9. Hak Jun Oh. Purification of Graphite Concentrate by Leaching with Phosphorus Chemistry. Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, Montreal, 2022. 150 p.

MAKYEYeva IRYNA

PhD, Associate Professor,
Department of Chemical Technologies and
Resource Saving, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5672-3097>
Scopus Author ID: [7003994762](https://orcid.org/0000-0001-5672-3097)
Researcher ID: X-2580-2018
E-mail: makyeyeva.is@knutd.com.ua

PATLUN DMYTRO

Postgraduate student,
Department of Chemical Technologies and
Resource Saving, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3832-1996>
E-mail: dimapatlun@gmail.com

KYSLOVA OLHA

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Department of Chemical Technologies and
Resource Saving, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-0223-1860>
Scopus Author ID: 22034723000
E-mail: kislova.ov@knutd.com.ua

KHOMENKO VOLODYMYR

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
Department of Electrochemical Power Engineering
and Chemistry, Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>
Scopus Author ID: 7004402598
Researcher ID: X-2214-2018
E-mail: v.khomenko@i.ua

NICULIN DMYTRO

Postgraduate student,
Department of Chemical Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: nikulin74@gmail.com

MAKYEYeva I. S., KYSLOVA O. V., PATLUN D. V., KHOMENKO V.G., NIKULIN D. O.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY
OF NATURAL GRAPHITE CHEMICAL PURIFICATION**

Purpose. This study aims to analyze the efficiency of chemical purification processes for natural graphite samples using mineral acids and their mixtures with the ammonium fluoride.

Methodology. Purification of natural graphite samples was performed by their treatment with nitric and sulfuric acid solutions, supplemented with ammonium fluoride. The degree of graphite purification was assessed through the method of ashing the mass in a muffle furnace until a constant weight was achieved at 1050 °C. The chemical composition of the impurities within the graphite samples was identified by X-ray fluorescence analysis using the Oxford Instruments X-Supreme 8000 spectrometer (United Kingdom).

Findings. A variety of chemical purification methods for graphite materials, specifically for the GAK-2 and GUPG-92 brands, were evaluated utilizing mineral acids of diverse compositions. The graphite samples underwent analysis both before and after the chemical purification process. The investigation revealed that the proposed method of purification with $H_2SO_4 + NH_4F$ solution successfully achieved graphite purity levels of 99.97% for GAK-2 in single-stage method and 99.44% for GUPG-92 in two processing stages.

Originality. The efficacy of the proposed method for acid treatment, particularly in the presence of an ammonium fluoride additive for the purification of selected samples, was confirmed by the X-ray fluorescence and gravimetric analysis. Notably, this study marks the first instance of employing diluted acid solutions for the effective purification of graphite.

Practical value. The production of chemically purified graphite holds significant relevance for advancing the technological processes involved in the industrial manufacture of raw materials essential for lithium-ion batteries and innovative materials such as graphene. The formulation and enhancement of effective chemical purification methods are instrumental in diminishing the costs associated with procuring graphite of high purity.

Keywords: graphite; chemical purification; ash content; mineral acids; ammonium fluoride.

УДК 678

СТРАШЕНКО В. К., МИРОНЮК О. В.

Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Україна

ОДЕРЖАННЯ ТЕКСТУРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛЕВИХ ШАБЛОНІВ

Мета. Порівняння структури та водовідштовхувальні властивостей за допомогою визначення кута змочування текстурованих поверхонь при використанні металевих майстер-форм для виготовлення зразків різними способами.

Методика. Структура поверхонь які були отримані в результаті різноманітних способів виготовлення, а саме тепмлатний метод, заповнення шаблону мономером із подальшою полімеризацією та нанесення розчину полімеру та розчинника із подальшим видаленням рідкого середовища, вивчають за допомогою оптичної мікроскопії. Регулярність структури досліджувалось аналізом цифрових зображень, які були зроблені за допомогою оптичної мікроскопії. Водовідштовхувальні властивості досліджувалися методом сидячої краплі із використанням гоніометричної приставки.

Результати. Виготовлено текстуровані поверхні з різних матеріалів а саме: поліетилену низької густини, полідиметилсилоксанового каучуку, етилен-пропіленового каучуку. Вказано методи за якими вони виготовляються. Описано якісну характеристику кожної поверхні із врахуванням геометрії шаблону. Виконано кількісний аналіз значень кута водовідштовхування текстурованих та нетекстурованих поверхонь. Доповнено причиною та наслідки погіршення властивостей зразків. Запропоновано методи їх вирішення.

Наукова новизна. За допомогою оптичної мікроскопії встановити оптимальний метод при якому буде виконуватися одна із ключових умов виготовлення текстурованих поверхонь. При цьому використовуючи шаблон із металу, а саме алюмінію, створили шаблони із інших матеріалів. Також визначити кількісну характеристику впливу текстурування поверхонь обраних матеріалів без виконання двох інших критеріїв.

Практична значимість. Описані методи можуть використовуватися для масштабування процесу виготовлення текстурованих поверхонь із використання більш легких методів та різноманітних матеріалів.

Ключові слова: текстуровані поверхні; водовідштовхувальні поверхні; тепмлатний метод кут змочування; мікротекстура.

Вступ. Використання текстурованих поверхонь для надання їм особливих властивостей, в першу чергу, пов'язаних із контактом з рідинами було досліджено і розвинено як аналог подібних природних поверхонь (листя деяких рослин, поверхня лапок комах, тощо [1]). Наразі, за рахунок формування текстури можна значно підвищувати водо- та олеофобність поверхонь, зі зниженою поверхневою енергією або ж, навпаки, підвищувати спорідненість до полярних рідин в тому разі коли використовуються матеріали здатні до полярних вандерваальсівських та водневих взаємодій [2]. Очевидно, що найбільш виражений ефект можна отримати використовуючи такі матеріали, полярна і воднева компоненти поверхневої енергії яких є незначними. До таких матеріалів відносяться, в першу чергу полімери, а саме: поліолефіни, фторовані каучуки, поліорганосилоксанові каучуки, тощо [3]. Також не менше значущим є вплив який обумовлюється таким фактором як поверхнева власна гідрофобність матеріалу. Очевидно, що найбільш виражений ефект можна отримати використовуючи такі матеріали, полярні і водневі компоненти поверхневої енергії яких є незначними. До таких матеріалів відносяться, в першу чергу полімери, а саме: поліолефіни, фторовані каучуки, поліорганосилоксанові каучуки, тощо [4].

Підвищене відштовхування води на розчинів на їх основі є корисною властивістю, оскільки дозволяє досягти значно нижчого тертя між рідиною та матеріалом труб при транспортуванні [5], антижеледної здатності за рахунок зниження адгезії криги [6], більш

контрольованих процесів конденсації і закипання води, у певній мірі антикорозійних властивостей [7] та зниженого брудотримування [8].

Однією з основних проблем, які стримують практичне використання таких поверхонь є низька масштабованість їх виробництва [2], що пояснюється інструментальною складністю проведення, наприклад, осадження з газової фази на масштабні поверхні або хімічного травлення рулонного матеріалу. Темплатний метод, що використовує шаблон для передачі оберненої текстури полімерам є одним з кандидатів для вирішення згаданої проблеми масштабування. Він може бути оформлений як створення текстури за рахунок притискання металевого шаблону до розігрітого до температури, необхідної для переходу у в'язко-текучий стан полімеру у формі плівки з наступним охолодженням і фіксацією текстури охолодженням [9]. Другим варіантом є заповнення шаблону рідким мономером або олігомером з наступним отвердженням [10]. Третій варіант цього методу включає нанесення розчину полімеру на поверхню шаблону з наступним видаленням розчинника і стабілізацією плівки [11]. Перераховані методи мають переваги та недоліки, зокрема – другий та третій у порівнянні з першим потребують певного часу для протікання хімічної реакції отвердження та видалення розчинника, що може впливати на масштабованість. Текстура поверхонь, одержаних першим методом суттєво залежатиме від текучості полімеру та рівномірності розподілу сил притискання, тощо.

Постановка задачі. Мета роботи: порівняти рівномірність та водовідштовхувальні характеристики текстур, отриманих при використанні металевих майтер-форм та різних методів одержання відтисків.

Об'єкт та методи дослідження: Об'єктом дослідження є водовідштовхування текстурованих поверхонь полімерів, які були одержані методами полімеризації на текстурованій майстер-підкладці, гарячим пресуванням та випаровуванням розчинника.

Методи дослідження:

Шаблон для відтисків був виготовлений обробкою лазером поверхні металевого алюмінію марки 7500. При створенні шаблону використовувалося джерело випромінювання із середньо потужністю 6 Вт при довжині хвилі 1030 нм та частоті повторення 60 кГц з тривалістю імпульсу приблизно 360 фс. Стурктури формувалися із швидкістю 60мм/с [12].

Для одержання відтисків методом гарячого пресування металевий шаблон розташовувався на поверхні нагрівача та прогрівався до температури 110° С, після чого плівка поліетилену високого тиску товщиною 60 мкм прикладалася до його поверхні та відтискувалася силіконовим валиком в один прохід. Шаблон знімався з нагрівача та охолоджувався на повітрі до кімнатної температури, після чого плівка видалялася з поверхні витягуванням

Відбиток шаблону на полідиметилсилоксановому субстраті одержано з використанням двохкомпонентної системи SKA-035 з платиновим каталізатором. Отвердження відбувалося при кімнатній температурі протягом 3 діб.

Відбиток на етилен-пропіленовому каучуку виготовлявся в декілька етапів [13]. Першим кроком є виготовлено шаблон для відливки. Він виготовляється методом лиття під тиском силіконових гум. В якості основи було взято матеріал FSH-360 з дихлорбензойним каталізатором. Отвердження відбувалося при температурі 170° С протягом 15 хвилин. Основним матеріал для виготовлення текстурованих поверхонь було обрано етилен-пропіленовий каучук марки KEP 570 виробництва Kumho Polichem вміст етилену в якому складає 70%. Також в склад гумової суміші входять компоненти, головна мета яких активувати процес вулканізації. Deovulc BG 187 комплексний прискорювач який виготовляє компанія D.O.G. Chemie. Решта матеріалів виробництва Granchem. Суміш створювалася за рецептурой яка наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Рецептура етилен-пропіленової гуми

№	Назва компоненту	Масова частка
1	Етилен-пропіленовий каучук KEP 570	100.00
2	Стеаринова кислота	1.00
3	Сірка	1.5
4	Бутил цимат	1.20
5	Deovulc BG 187	6.00
6	Оксид цинку	5.00

Після виготовлення сирової гумової суміші її розчиняли в ксилолі при температурі 90° С та носили на силіконовий шаблон із подальшим висушенням розчинника при кімнатній температурі декілька разів для формування зразків товщиною 0,5–0,7 мм. Подальша вулканізація проводилася в сушильній шафі при температурі 160° С в протягом 10 хвилин.

Структура зразків була досліджена методом оптичної мікроскопії на мікроскопі Konus Academy з використанням камери Delta Optical HD5 в режимі просвічування. Для одержання зображень профіля елементів текстури були виконані зрізи матеріалів, які закріплювалися в еластичному холдері, а для видалення артефактів зображення використовувався режим фільтру білого кольору в програмі ScopeTek Photo, що дозволило одержати профілограми.

Значення кутів змочування матеріалів водою з точністю до $\pm 3^\circ$ вимірювалося методом сидячої краплі на мікроскопі ДІП-10 М з гоніометричною приставкою.

Результати дослідження. Оскільки вихідний шаблон був отриманий методом фемтосекундної лазерної абляції, верхня частина текстури «виступи» та нижня частина «западини» має різний тип поверхні (рис. 1). Виступи, які були западинами шаблону мають додатковий вимір структури, що вочевидь зумовлено режимом взаємодії лазерного променя з поверхнею металу. Загалом, поверхня нижньої частини текстури більш рівномірна ніж верхньої.

Періодичний характер текстури шаблону та його орієнтація відтворюється у всіх трьох методах – гарячого пресування, полімеризації та видалення розчинника. Період текстури складає 60 мкм, ширина виступів і западин – по 15 мкм.

Форма профілю виступів, втім у текстур суттєво відрізняється (рис. 2). Найбільш регулярною вона є у зразку, одержаного на етилен-пропіленовому каучуку (рис. 2 а). Висота виступів складає 20 мкм, геометрично вони повторюють нерівності вихідного металевого шаблону, проте піки виступів деформовані, що може бути пов'язано із недовгою текучістю матеріалу із якого виготовлено шаблон

Виступи на поверхні поліетилену менш чітко відповідають структурі вихідного темплату а є «скошеними», вірогідно внаслідок наступної після формування деформації до остаточного переходу з в'язкотекучого стану. такі дефекти можуть виникати при передчасному видаленні зразку з поверхні шаблону. Висота текстури наближається до 20 мкм, що свідчить про заповнення западин шаблону розплавом поліетилену.

Найбільш нерегулярним є відтиск, який утворився внаслідок використання полідиметилсилоксанового каучуку, що може бути пояснено наявністю уловленого повітря між рідким матеріалом і шаблоном під час утворення відбитку.

Водовідштовхувальні властивості поверхонь в роботі були охарактеризовані значенням кута змочування водою (рис. 3). Показано що при текстурованні поверхонь величина кута змочування збільшується, що може бути пояснено досягненням стану Венцеля або Касі [14]. У першому випадку – величина збільшення пропорційна до значення шорсткості, в другому – визначається кількістю уловленого в поверхневій текстурі матеріалу повітря, а точніше – співвідношенням долей поверхні краплі води, що контактують з текстурою та повітрям.

Максимальні значення кута змочування характерні текстурам на основі полідиметилсилоксану – 144° , мінімальні – одержаним з етилен-пропіленового каучуку: 126° .

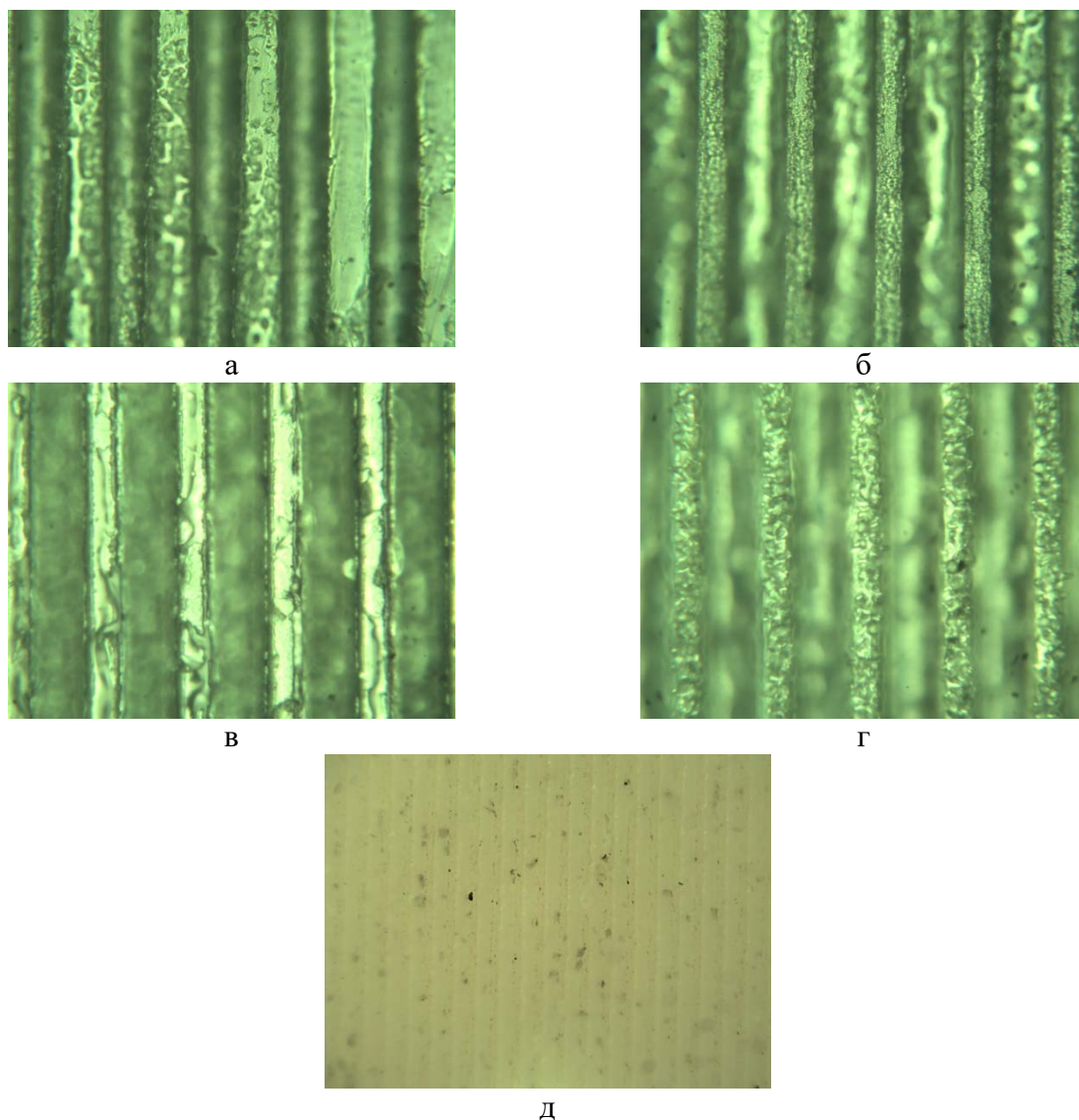


Рис. 1. Оптична мікроскопія текстур на поверхні: а,б – поліетилену низької густини зі збільшенням $\times 480$ (западини та виступи відповідно); в,г – полідиметилсилоксанового каучуку зі збільшенням $\times 480$ (западини та виступи відповідно); д – етилен-пропіленового каучуку зі збільшенням $\times 120$

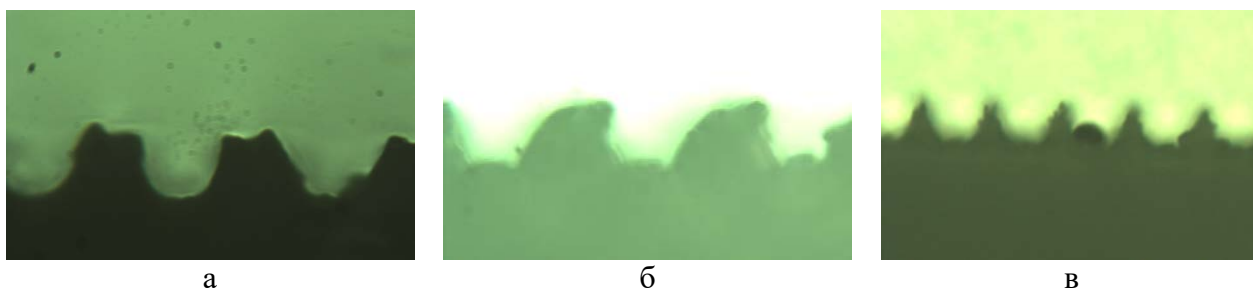


Рис. 2. Профілограми текстур: а – етилен-пропіленового каучуку ($\times 600$); б – поліетилену низької густини ($\times 600$); в – полідиметилсилоксанового каучуку ($\times 240$)

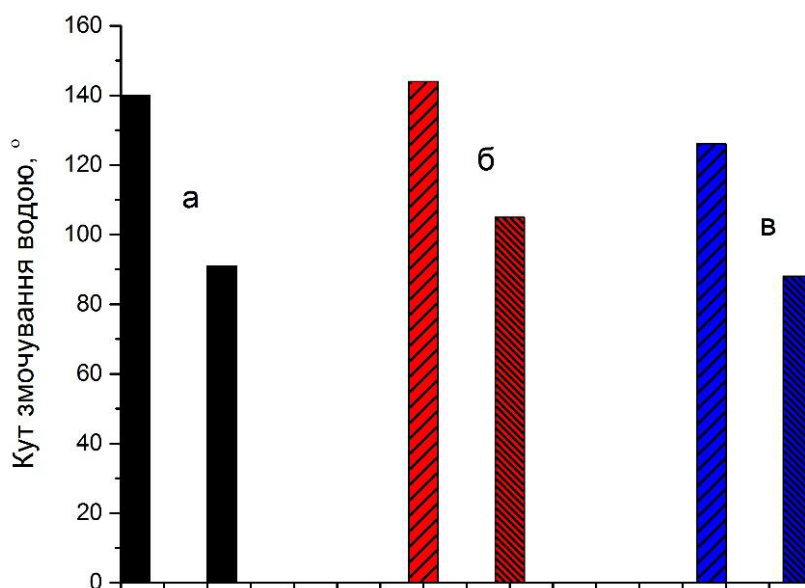


Рис. 3. Змочуваність водою текстурованих та нетекстурованих поверхонь:
а – поліетилену високого тиску; б – полідиметилсилоксанового каучуку;
в – етилен-пропіленового каучуку

Якщо припустити що на всіх досліджуваних поверхнях досягається виключно стан Венцеля, по співвідношенню кута змочування такої поверхні і нетекстурованої з того ж матеріалу може бути визначено параметр шорсткості для кожної з них (табл. 2). Наближено цей параметр може бути розраховано також на основі аналізу зображень профілів матеріалів (рис. 2).

Таблиця 2

Порівняння шорсткості поверхонь

Матеріал	Кут змочування пласкої поверхні, град.	Кут змочування текстури, град.	Шорсткість за Венцелем	Шорсткість геометрична
етилен-пропіленовий каучук	88	126	1,43	1,47
поліетилен низької густини	91	140	1,53	1,51
полідиметилсилоксан	105	144	1,37	1,75

Значення шорсткості, розраховане за Венцелем співпадає з геометричним для етилен-пропіленового каучуку та поліетилену низької густини та значно відрізняється у випадку полідиметилсилоксану, що може бути пояснено наявністю змішаного стану змочування Венцеля-Касі.

Висновки. Практично реалізовано ряд технік одержання відбитків текстури поверхні металевого шаблону. Одержані відбивки текстур за рівномірністю і точністю відтворення морфології вихідного штапу можуть бути розташовані в по мірі зниження в ряді методів: випаровування розчинника – відтиск гарячим штапом – використання герметиків. Показано, що максимальне водовідштовхування характерне для поверхонь на основі полідиметилсилоксану за рахунок реалізації стану змочування Касі.

References

Література

- Agarwal, H., Nyffeler, K. E., Blackwell, H. E., Lynn, D. M. (2021). Fabrication of slippery Liquid-Infused coatings
- Agarwal H., Nyffeler K. E., Blackwell H. E., Lynn D. M. Fabrication of slippery Liquid-

- in flexible Narrow-Bore tubing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(46), 55621–55632.
2. Bazyar, H., Xu, L., De Vries, H. J., Porada, S., Lammertink, R. G. (2021). Application of liquid-infused membranes to mitigate biofouling. *Environmental Science*, 7(1), 68–77.
3. Bhagat, S. D., Gupta, M. C. (2015). Superhydrophobic microtextured polycarbonate surfaces. *Surface & Coatings Technology*, 270, 117–122.
4. Bohn, H. F., Federle, W. (2004). Insect aquaplaning: Nepenthes pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(39), 14138–14143. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405885101>.
5. Myronyuk, O., Baklan, D., Rodin, A. M., Vanagas, E., Zuo, Y. (2023). Owens–Wendt characterization of Femtosecond-Laser-Textured hydrophobic aluminum surfaces. *Coatings*, 13(6), 1104.
6. Pornea, A. M., Puguan, J. M. C., Deonikar, V. G., Kim, H. (2020). Fabrication of multifunctional wax infused porous PVDF film with switchable temperature response surface and anti corrosion property. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry. Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*, 82, 211–219.
7. Sojoudi, H., Wang, M., Boscher, N. D., McKinley, G. H., Gleason, K. K. (2016). Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces. *Soft Matter*, 12(7), 1938–1963.
8. Wenzel, R. N. (1936). Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial and Engineering Chemistry*, 28 (8), 988–994.
9. Wong, T. S., Kang, S. H., Tang, S., Smythe, E. J., Hatton, B. D., Grinthal, A., Aizenberg, J. (2011). Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature* (London), 477 (7365), 443–447.
10. Yao, W., Wu, L., Sun, L., Jiang, B., Pan, F. (2022). Recent developments in slippery liquid-infused porous surface. *Progress in Organic Coatings* (Print), 166, 106806.
11. Yeong, Y. H., Wang, C., Wynne, K. J., Gupta, M. C. (2016). Oil-Infused Superhydrophobic Silicone Material for Low Ice Adhesion with Long-Term Infusion Stability. *ACS Applied Materials & Interfaces* (Print), 8 (46), 32050–32059.
- Infused coatings in flexible Narrow-Bore tubing. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. № 13(46). P. 55621–55632.
2. Bazyar H., Xu L., De Vries H. J., Porada S., Lammertink R. G. Application of liquid-infused membranes to mitigate biofouling. *Environmental Science*. 2021. № 7(1). P. 68–77.
3. Bhagat S. D., Gupta M. C. Superhydrophobic microtextured polycarbonate surfaces. *Surface & Coatings Technology*. 2015. № 270. P. 117–122.
4. Bohn H. F., Federle W. Insect aquaplaning: Nepenthes pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2004. № 101 (39). P. 14138–14143. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405885101>.
5. Myronyuk O., Baklan D., Rodin A. M., Vanagas E., Zuo Y. Owens–Wendt characterization of Femtosecond-Laser-Textured hydrophobic aluminum surfaces. *Coatings*. 2023. № 13(6). Art. 1104.
6. Pornea A. M., Puguan J. M. C., Deonikar V. G., Kim H. Fabrication of multifunctional wax infused porous PVDF film with switchable temperature response surface and anti corrosion property. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry. Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020. № 82. P. 211–219.
7. Sojoudi H., Wang M., Boscher N. D., McKinley G. H., Gleason K. K. Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces. *Soft Matter*. 2016. № 12(7). P. 1938–1963.
8. Wenzel R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1936. № 28(8). P. 988–994.
9. Wong T. S., Kang S. H., Tang S., Smythe E. J., Hatton B. D., Grinthal A., Aizenberg J. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature* (London). 2011. № 477 (7365). P. 443–447.
10. Yao W., Wu L., Sun L., Jiang B., Pan F. Recent developments in slippery liquid-infused porous surface. *Progress in Organic Coatings* (Print). 2022. № 166. Art. 106806.
11. Yeong Y. H., Wang C., Wynne K. J., Gupta M. C. Oil-Infused Superhydrophobic Silicone Material for Low Ice Adhesion with Long-Term Infusion Stability. *ACS Applied Materials & Interfaces* (Print). 2016. № 8 (46). P. 32050–32059.

12. Yu, M., Liu, M., Hou, Y., Fu, S., Zhang, L., Li, M., Wang, D. (2019). Facile fabrication of biomimetic slippery lubricant-infused transparent and multifunctional omniphobic surfaces. *Journal of Materials Science*, 55 (10), 4225–4237.
13. Zhu, G. H., Cho, S., Huan, Z., Zhao, M., Zacharia, N. S. (2018). Slippery Liquid-Infused porous surfaces (SLIPS) using Layer-by-Layer polyelectrolyte assembly in organic solvent. *Langmuir*, 34 (16), 4722–4731.
14. Prudatko, A. V., Myronyuk, O. V. Sviderskiy, V. A. (2015). Analysis of approaches to mathematical description of the characteristics of materials with high hydrophobicity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, No. 5 (77), P. 30–41. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50647.
12. Yu M., Liu M., Hou Y., Fu S., Zhang L., Li M., Wang D. Facile fabrication of biomimetic slippery lubricant-infused transparent and multifunctional omniphobic surfaces. *Journal of Materials Science*. 2019. № 55 (10). P. 4225–4237.
13. Zhu G. H., Cho S., Huan Z., Zhao M., Zacharia N. S. Slippery Liquid-Infused porous surfaces (SLIPS) using Layer-by-Layer polyelectrolyte assembly in organic solvent. *Langmuir*. 2018. № 34 (16). P. 4722–4731.
14. Prudatko A. V., Myronyuk O. V. Sviderskiy V. A. Analysis of approaches to mathematical description of the characteristics of materials with high hydrophobicity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 5, No. 5 (77), P. 30–41. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50647.

STRASHENKO VOLODUMIR

PhD Student, Department of Chemical
Technology of Composite Materials,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
E-mail: mailto:strashenkovork17@gmail.com

MYRONYUK OLEKSIY

PhD, Associate Professor, Department of Chemical
Technology of Composite Materials,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0499-9491>
Scopus Author ID: 57190497257
Researcher ID: I-8423-2017
E-mail: airshape@ukr.net

STRASHENKO V. K., MYRONYUK O. V.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

**GETTING TEXTURED SURFACES OF POLYMER MATERIALS
USING METAL TEMPLATES**

Objective. To compare the structure and water repellent properties by determining the wetting angle of textured surfaces using metal master molds for making samples through various methods.

Methodology. The structure of surfaces obtained through different manufacturing methods, namely templating method, filling the template with monomer followed by polymerization, and applying polymer and solvent solution followed by removal of the liquid medium, is studied using optical microscopy. The regularity of the structure was analyzed by digital images taken with optical microscopy. Water repellent properties were investigated using the sessile drop method with a goniometric attachment.

Results. Textured surfaces were produced from various materials, including low-density polyethylene, polydimethylsiloxane rubber, and ethylene-propylene rubber. The methods used for their production are indicated. The qualitative characteristics of each surface, considering the template geometry, are described. A quantitative analysis of the wetting angle values of textured and non-textured surfaces was conducted. The causes and consequences of the deterioration in sample properties are supplemented, along with proposed methods for their resolution.

Scientific novelty. Using optical microscopy to establish the optimal method for fulfilling one of the key conditions for producing textured surfaces. By utilizing a metal template, specifically aluminum, templates from other materials were created. Additionally, determining the quantitative impact of surface texturing on selected materials without fulfilling two other criteria.

Practical significance. The described methods can be applied to scale up the process of manufacturing textured surfaces using lighter methods and a variety of materials.

Keywords: textured surfaces; water-repellent surfaces; templating method; wetting angle; microtexture.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

Комп'ютерний набір та макетування

КРИВОНОС Олена

Технічний редактор

ПАНАСЮК Ігор

Відповідальний за поліграфічне виконання

ОВЕЧКІНА Лілія

Підп. до друку 17.04.2024. Формат 60×84 1/8.
Ум. друк. арк. 15,34. Облік. вид. арк. 12,00. Наклад 100 пр. Зам. 2015.

Видавець і виготовлювач Київський національний університет технологій та дизайну.
вул. Мала Шияновська, 2, м. Київ, 01011, Україна.

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

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 Olena

Technical Editor

PANASIUK Ihor

Responsible for printing

OVECHKINA Liliia

Printing proof 17.04.2024. Format 60×84 1/8.
Conditional sheet 15.34. Calculated sheet 12.00. Circulation 100 copies. Order N 2015.

KNUTD Instant Printing Department.
Mala Shyianovska Street, 2, Kyiv, 01011, Ukraine.

Certificate KB №24822–14762 ПР від 19.04.2021 р.

Certificate ДК № 993, 24.07.2002.