

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТЕХНОЛОГІЇ
ТА
ІНЖИНІРИНГ

№ 3(20), 2024

DOI:10.30857/2786-5371.2024.3

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).

№ 3(20), 2024

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: серія КВ №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@knu.edu.ua; <http://vistnyk.knu.edu.ua/>

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну, протокол № 11 від 19.06.2024 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 3(20), 2024

DOI:10.30857/2786-5371.2024.3

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).

№ 3(20), 2024

The state registration of print media is KB № 24822-14762 ИП, 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@knuvd.edu.ua; <http://vistnyk.knuvd.edu.ua/>

Recommendations from Science Council of Kyiv National University of Technologies and Design, Protocol № 11, originating date 19.06.2024.

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, 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. **Вінтоняк В. М.**
ІННОВАЦІЇ В ЕЛЕКТРОНІЦІ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ У ПОВЕРХНЕВИХ ШАРАХ ҐРУНТУ: ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА НАПРЯМКИ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ 9
2. **Денісов Р. В., Попович П. В.**
ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА МІКРОКОНТРОЛЕРАХ З ПОДАЛЬШИМ ГОЛОСОВИМ ВИВОДОМ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ 21
3. **Коробченко Є. О., Горобець В. А., Крикун Є.**
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ НА ШВЕЙНИХ МАШИНАХ 31
4. **Місяць М. В., Орловський Б. В.**
ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО ЗАХОПЛЮВАЧА ДЕТАЛЕЙ КРОЮ З ТЕКСТИЛЮ ЗІ СТОСУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ШВЕЙНИХ МАШИН 47
5. **Плешко С. А., Ковальов Ю. А.**
ЗАЛЕЖНІСТЬ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ В'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ ВІД КОНСТРУКЦІЇ ГОЛКИ 57
6. **Посвістак В. С., Мірошніченко Д. В.**
АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ВБУДОВАНИХ АЛГОРИТМІВ ВІДСТЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ OPENCV ПРИ ОБРОБЦІ КАДРІВ ІЗ БПЛА 64

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ІНДУСТРІЇ МОДИ, ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЮ, ОДЯГУ ТА ВЗУТТЯ

7. **Дмитрик О. М., Галавська Л. Є., Харченко Ю. М.**
ВПЛИВ ТИПУ ПЛОСКОВ'ЯЗАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ПОКАЗНИКИ СТІЙКОСТІ ТРИКОТАЖНОГО МАТЕРІАЛУ З ВИСОКОМІЦНИХ НИТОК ДО ДІЇ МЕХАНІЧНИХ УШКОДЖЕНЬ (ПРОКОЛ СТЕРЖНЕМ ТА ПРОДАВЛЮВАННЯ КУЛЬКОЮ) 82

ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

8. **Вахітов Р. А., Калафат К. В., Таран Н. А., Бессарабов В. І., Раєнко Г. Ф., Шологон В. І., Короткіх М. І., Вахітова Л. М.**
ЕТЕРИ ЦЕЛЮЛОЗИ ЯК МОДИФІКАТОРИ РЕОЛОГІЇ ВОГНЕЗАХИСНИХ ФАРБ РЕАКТИВНОГО ТИПУ 98
9. **Нікітіна О. О., Робак А. Ю., Циба Д. С.**
ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ВИКОРИСТАННЯ ЛІКАРСЬКИХ РОСЛИН У СУЧАСНІЙ ФАРМАЦЕВТИЦІ 110
10. **Савчук А. П., Сова Н. В.**
ПЕРЕРОБКА ПОЛВІНІЛХЛОРИДУ В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОЇ ЕКОНОМІКИ 127

TABLE OF CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES, ELECTRONICS, MECHANICAL AND ELECTRICAL ENGINEERING

1. **Vintoniak V. M.**
INNOVATIONS IN ELECTRONICS FOR DETECTING OBJECTS IN SURFACE LAYERS OF SOIL: A REVIEW OF METHODS AND DIRECTIONS FOR FURTHER IMPROVEMENT 9
2. **Denisov R. V., Popovych P. V.**
PECULIARITIES OF APPLICATION OF OBJECT RECOGNATION SYSTEM IN REAL TIME ON MICROCONTROLLERS WITH SUBSEQUENT VOICE OUTPUT OF INFORMATION FOR PEOPLE WITH VISUAL IMPAIRMENTS 21
3. **Korobchenko E., Horobets V., Krykun E.**
IMPROVING THE QUALITY OF THE MATERIAL TRANSPORT PROCESS IN SEWING MACHINES 31
34. **Misiats M. V., Orlovsky B. V.**
PARAMETRIC SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE AERODYNAMIC GRIPPER OF CUT DETAILS FROM THE STACK OF TEXTILE FOR AUTOMATED SEWING MACHINES LOADING 47
5. **Pleshko S. A., Kovalov Yu. A.**
DEPENDENCE OF KNITTING MACHINE OPERATION DURABILITY ON NEEDLE DESIGN 57
6. **Posvistak V. S., Miroshnychenko D. V.**
ANALYSIS OF OPENCV OBJECT TRACKING ALGORITHMS WHEN PROCESSING UAV FRAMES 64

MATERIAL SCIENCE IN THE TEXTILE, CLOTHING AND FOOTWEAR MANUFACTURING INDUSTRIES

7. **Dmytryk O. M., Halavska L. Ye., Kharchenko Yu. M.**
THE INFLUENCE OF A SPECIFIC FLAT KNITTING EQUIPMENT ON THE RESISTANCE OF KNITTED MATERIALS MADE OF HIGH-STRENGTH YARNS TO MECHANICAL DAMAGE (PIERCING WITH A ROD AND PRESSING WITH A BALL) 82

CHEMICAL AND BIOPHARMACEUTICAL TECHNOLOGIES

8. **Vakhitov R. A., Kalafat K. V., Taran N. A., Bessarabov V. I., Rayenko G. F., Sholohon V. I., Korotkikh M. I., Vakhitova L. M.**
CELLULOSE ETHERS AS RHEOLOGY MODIFIERS OF REACTIVE FIRE RETARDANT PAINTS 98
9. **Nikitina O. O., Robak A. Yu., Tsyba D. S.**
INNOVATIVE APPROACHES TO THE USE OF MEDICINAL PLANTS IN MODERN PHARMACY 110
10. **Savchuk A. P., Sova N. V.**
POLYVINYL CHLORIDE PROCESSING IN A CYCLICAL ECONOMY 127

УДК 621.38

ВІНТОНЯК В. М.

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна

ІННОВАЦІЇ В ЕЛЕКТРОНІЦІ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ У ПОВЕРХНЕВИХ ШАРАХ ҐРУНТУ: ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА НАПРЯМКИ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ

***Мета.** Дана публікація розкриває комплексний аналіз сучасних електронних технологій для виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту, дозволяє оцінити їх ефективність та точність, а також визначити перспективні напрямки для подальших інновацій та досліджень у цій галузі.*

***Методика.** Для досягнення цілей дослідження було застосовано теоретичний аналіз наукової літератури, а також методи аналізу та узагальнення наявних даних. Основними інструментами дослідження стали порівняльний аналіз та класифікація використовуваних методів виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту. Вирішення наукових завдань проводилося за допомогою системного підходу у виборі матеріалів, використання індуктивного та логічного аналізу, методів спостереження для аналізу інформації, отриманої з літературних джерел.*

***Результати.** У дослідженні було проаналізовано основні технології виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту: георадари (GPR), металодетектори, лазерну доплерівську віброметрію, магнітометрію та оптичні методи. Було виявлено, що комбінація різних технологій може значно підвищити точність та ефективність виявлення об'єктів. Ця робота також підкреслила потенціал застосування машинного навчання для покращення класифікації об'єктів та зменшення кількості помилкових спрацювань. Надалі було встановлено, що зменшення маси та енергоспоживання детектувальних систем може сприяти їхньому застосуванню на безпілотних апаратах, що відкриває нові перспективи для використання цих технологій для дистанційного моніторингу та дослідження важкодоступних територій.*

***Наукова новизна.** У даній роботі вперше систематизовано та проведено детальний аналіз наявних технологій для виявлення об'єктів у верхніх шарах ґрунту, зокрема GPR, металодетекторів, лазерної віброметрії, магнітометрії та оптичних методів за такими критеріями, як глибина виявлення, вартість обладнання та можливість інтеграції з іншими системами. Проведений аналіз виявив прогалини в сучасних дослідженнях, що дозволяє визначити напрямки для подальшого розвитку кожного з методів, які включають вдосконалення точності, зменшення енергоспоживання та маси приладів для ефективного використання на БПЛА і наземних роботизованих системах.*

***Практична значимість.** Отримано результати порівняння таких електронних технологій, як GPR, металодетектори, лазерна віброметрія, мультиспектральний імаджинг. Визначено сучасні тенденції розвитку даних технологій та можливості для подальших досліджень.*

***Ключові слова.** металодетектор; магнітометрія; GPR; ґрунтопроникний радар; ґрунт; оптичні методи; лазерна віброметрія.*

Вступ. У сучасному світі актуальність проблеми ідентифікації та виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту стає все більш важливою у різних сферах життя, особливо в контексті забезпечення безпеки територій від небезпечних об'єктів. Це питання є одним із ключових для міжнародного співтовариства у контексті збройних конфліктів та постконфліктного відновлення. Наприклад, в Україні внаслідок бойових дій заміновано близько чверті території, що потребує значних зусиль для проведення безпечного розмінування [1]. Цей процес не тільки складний, але й пов'язаний з ризиками травм і смертей серед саперів. За експертними оцінками, гуманітарне розмінування, з використанням наявних ресурсів у 500 груп, може тривати близько 757 років [2]. Подальший розвиток електронних методів виявлення може суттєво спростити і здешевити роботи у сферах будівництва та комунального господарства, де точне локалізування підземних комунікацій є критично

важливим. В урбанізованих умовах неточні земляні роботи можуть спричинити значні фінансові збитки через пошкодження інфраструктури та затримки в усуненні наслідків аварій [3].

Таким чином, попри значні наукові досягнення у даній галузі, подальші дослідження в області інновацій електроніки для виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту мають критичне значення для вирішення згаданих вище проблем. Впровадження новітніх технологій здатне не лише підвищити ефективність процесів розмінування та зменшити асоційовані з ними ризики, але й суттєво оптимізувати роботу у сферах, де потрібне точне виявлення підземних об'єктів.

Постановка завдання. Аналіз наукових джерел в галузі виявлення об'єктів у верхніх шарах ґрунту свідчить, що такі технології як металодетектори, георадари, лазерна віброметрія та оптичні системи, постійно розвиваються, вносячи інновації, які підвищують ефективність і точність виявлення. Всупереч значним досягненням, існують "білі плями" у дослідженнях, такі як інтеграція різних методів для забезпечення вищої точності та надійності систем, а також оптимізація енергоспоживання та ваги приладів для їх ефективного застосування в безпілотних наземних та літальних апаратах. Стаття має на меті дослідити ці прогалини, проаналізувати сучасний стан методів та визначити потенційні напрями для подальших удосконалень, що могли б забезпечити краще виявлення небезпечних та цінних об'єктів під землею.

Результати дослідження. Для виявлення та ідентифікації об'єктів у верхніх шарах ґрунту застосовуються різні методи. Вони базуються на реєстрації реакції виявленого об'єкта на вплив різних штучних фізичних полів, наприклад, електромагнітних, акустичних, сейсмічних, теплових, іонізованих тощо. Під впливом цих полів відгук прихованого об'єкта змінюється залежно як від типу збуджувального поля, так і від індивідуальних параметрів виявленого об'єкта.

На сьогодні металошукачі є найбільш поширеними і доступними засобами виявлення об'єктів у ґрунті. Найбільш поширені технології для побудови схемотехніки металошукачів: биття частот – BFO (Beat Frequency Oscillation) [4]; метод індукційного балансу, що використовує дуже низькі частоти – VLF/TR (Very Low Frequency/Transmitter-Receiver) [4]; імпульсний метод – PI (Pulse Induction) [4].

На рис. 1 зображена схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом VLF/TR.

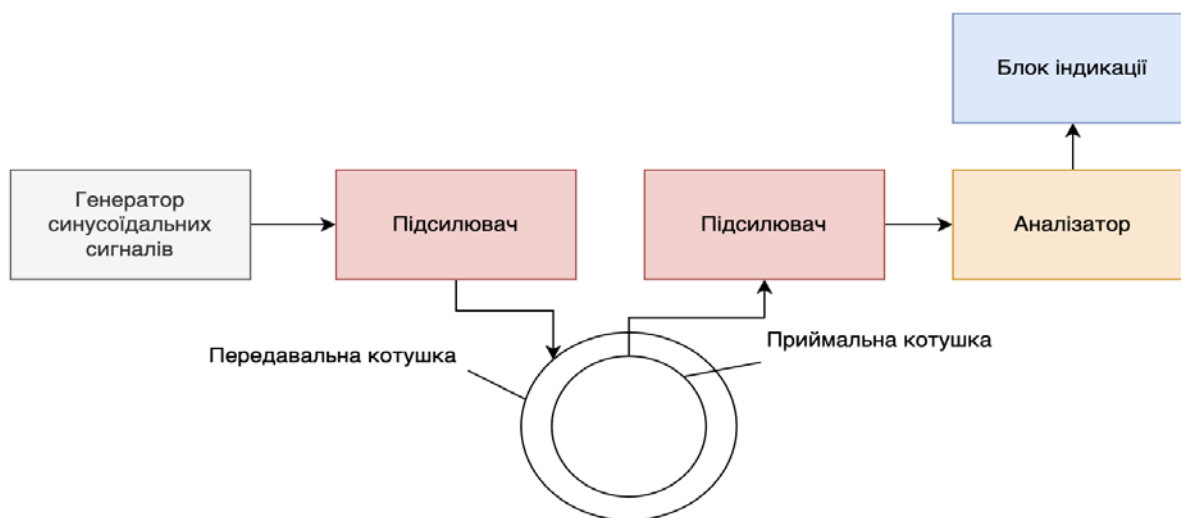


Рис. 1. Схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом VLF/TR

Дані металодетектори складаються з наступних основних елементів: генератор синусоїдальних сигналів – цей блок генерує синусоїдальні хвилі низької частоти, які є основою для випромінювання електромагнітного поля металодетектором; передавальна котушка – отримує синусоїдальні сигнали від генератора і перетворює їх в електромагнітне поле, яке випромінюється в землю; підсилювачі – забезпечують необхідне підсилення сигналів перед їх передачею на котушки та після приймання з котушок, відповідно підвищуючи ефективність детекції; приймальна котушка – вловлює електромагнітні хвилі, модифіковані наявністю металевих предметів у ґрунті, і перетворює їх назад в електричні сигнали; аналізатор – обробляє прийняті сигнали, аналізуючи їхні амплітуду та фазу для ідентифікації наявності та характеристик металевих об'єктів; блок індикації – відображає результати аналізу, надаючи оператору інформацію про розташування та можливий тип виявлених металевих предметів.

Дана схема є представленням принципу роботи VLF металодетектора, що використовується для виявлення металів на різних глибинах із можливістю дискримінації між різними типами металів.

Схема металодетектора на основі імпульсної індукції (PI), яка включає генератор імпульсів, підсилювач, комутатор, а також універсальну передавально-приймальну котушку, демонструє високу ефективність виявлення металевих об'єктів на значних глибинах (рис. 2). Даний метод особливо корисний в умовах, де необхідно глибоке проникнення в ґрунт без чутливості до мінералізації, що робить її ідеальною для таких застосувань, як розмінування та археологічні дослідження [5].

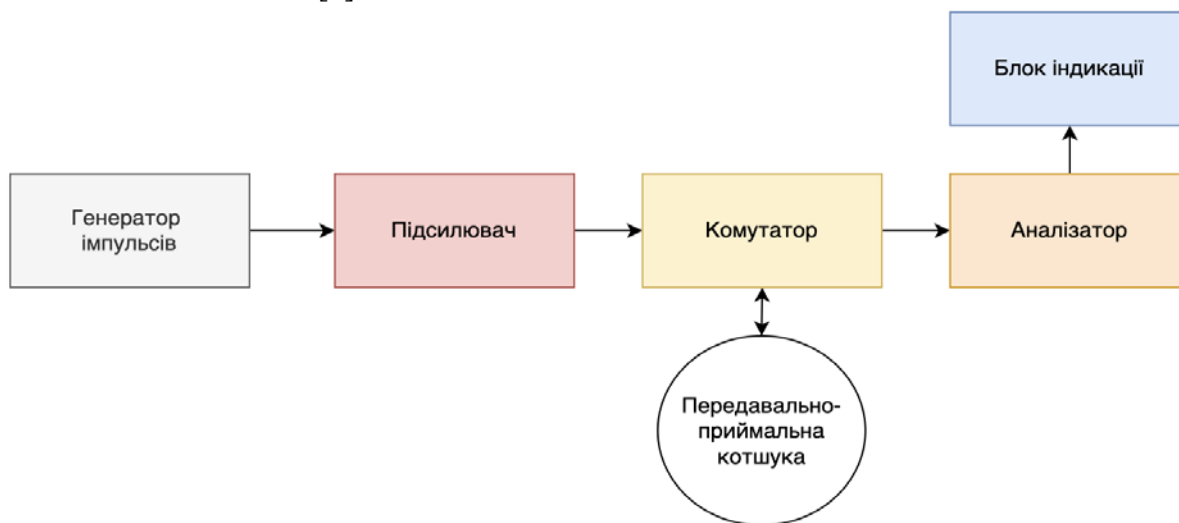


Рис. 2. Схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом PI

Генератор імпульсів в даній схемі відповідає за створення коротких високо потужних імпульсів електричного струму, які є необхідними для генерації магнітного поля передавальною котушкою; підсилювач – забезпечує необхідне підсилення електричних імпульсів від генератора перед тим, як вони будуть відправлені до котушки. Це дозволяє забезпечити достатню енергію для глибокого проникнення магнітного поля в ґрунт; передавально-приймальна котушка – використовується для генерації магнітного поля та приймання сигналів, створених відгуками від металевих предметів, індукованих у відповідь на це поле; комутатор – перемикає систему між режимами передачі та приймання, забезпечуючи, щоб передавальна котушка та система приймання сигналів не функціонували одночасно, що мінімізує ризик пошкодження приймача від високо потужних імпульсів; аналізатор – обробляє сигнали, отримані від котушки, аналізуючи характеристики відбитих

сигналів для визначення наявності та властивостей металевих об'єктів; блок індикації – відображає результати аналізу, надаючи користувачеві інформацію про виявлені металеві об'єкти, їх розташування, розміри, і можливо, тип.

На рис. 3 зображена схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом BFO.

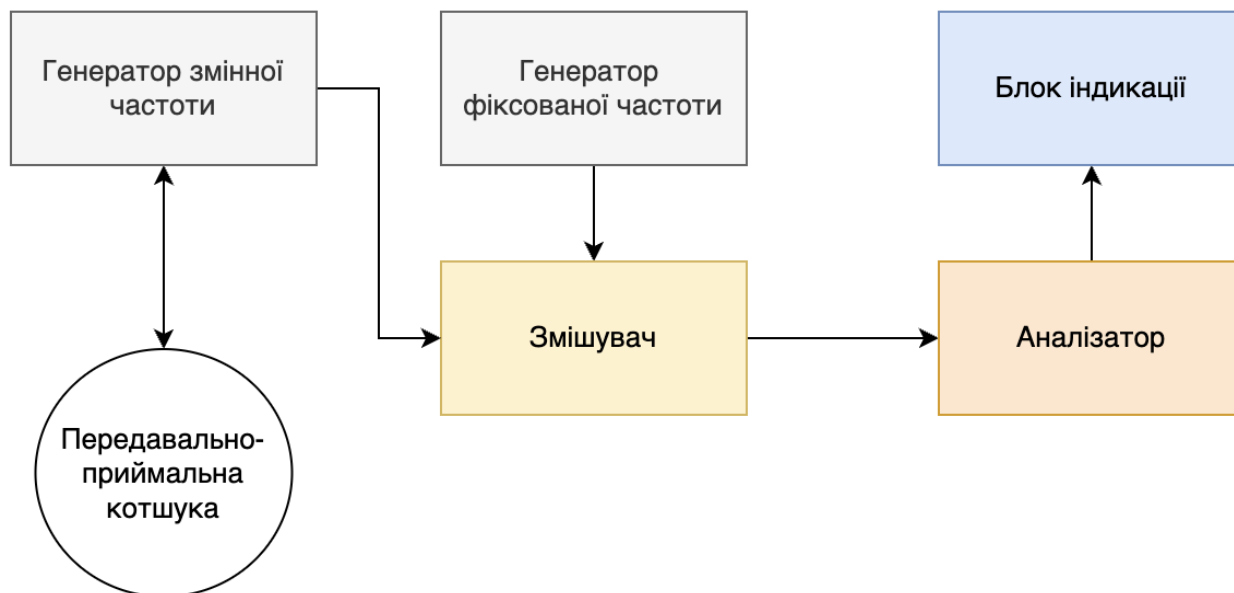


Рис. 3. Схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом BFO

На схемі представлено основні компоненти системи BFO металодетектора, які включають: генератор змінної частоти – створює сигнал змінної частоти, який подається на передавально-приймальну котушку для генерації електромагнітного поля; генератор фіксованої частоти – генерує сигнал фіксованої частоти, який використовується для створення опорного сигналу, необхідного для порівняння з прийнятим сигналом; передавально-приймальна котушка – використовується для передачі електромагнітних хвиль у навколишнє середовище та приймання хвиль, які відбиваються від металевих предметів; змішувач – поєднує сигнали з генераторів змінної та фіксованої частоти, виробляючи сигнал, частота якого дорівнює різниці частот вхідних сигналів, що дозволяє виявити зміни, спричинені металевими об'єктами; аналізатор – обробляє відмінності в частотах для визначення наявності та характеристик металевих об'єктів; блок індикації – відображає інформацію про виявлені об'єкти, зокрема їх тип та приблизне розташування.

Ця схема ілюструє фундаментальні принципи BFO металодетектора, який використовує биття частот між двома генераторами для виявлення металів. Цей метод забезпечує простоту та ефективність у виявленні металевих об'єктів, роблячи його популярним вибором для аматорських металошукачів.

В табл. 1 наведені результати порівняння основних видів металодетекторів.

Табл. 1 надає загальний огляд ключових характеристик кожного типу металодетектора. Як зображено на табл. 1, кожен тип металодетектора має свої переваги та недоліки. Найкращі характеристики щодо дискримінації різних типів металів має металодетектор типу VLF, який здатний досить точно розрізняти метали, зокрема немагнітні [4]. У при оцінці максимальної глибини виявлення великих металевих об'єктів найбільш ефективними є металодетектори типу PI, певні спеціалізовані моделі якого здатні виявляти об'єкти на глибині до 12 м [6]. З точки зору чутливості до виявлення малих об'єктів, таких як мідна монета, металодетектор

типу PI також демонструє найкращі характеристики та здатний виявляти їх на глибині до 40 см. Крім того, він ефективніше працює у високомінералізованих ґрунтах [4]. Перевагою металодетекторів типу BFO є простота конструкції, що робить їх дешевими та енергоощадними.

Таблиця 1

Характеристики основних типів металодетекторів

Характеристика	VLF (Дуже Низька Частота)	PI (Імпульсна Індукція)	BFO (Осцилятор Частоти Биття)
Робоча частота, kHz	3–30	0.1–4	100
Дискримінація	Високі можливості; здатність розрізняти різні типи металів.	Обмежена; може виявляти метали, але не розрізняти їх типи.	Обмежені; не може точно розрізняти різні типи металів; погано виявляє немагнітні метали.
Максимальна глибина виявлення великих об'єктів, м	0.5	12	0.3
Максимальна глибина виявлення мідної монети, см	30	40	7.62
Вартість та складність	Менш дорогі	Дорожчі та важчі	Найменш складні та найдешевші, але обмежені сучасні опції.
Споживання енергії	Звичайне споживання.	Високе споживання через потужні імпульси.	Низьке споживання завдяки простоті конструкції.

Для покращення характеристик металодетекторів використовуються різноманітні технології. Багаточастотність дозволяє металодетекторам типу VLF працювати на кількох частотах одночасно, що забезпечує кращу адаптацію до різних ґрунтових умов і збільшує ефективність виявлення різних типів металів [7]. Використання декількох частот також допомагає оптимізувати пошук малих об'єктів або об'єктів, що знаходяться на значній глибині.

Підсилення прийнятого сигналу безпосередньо на котушці включає підсилення слабких сигналів прямо на приймачі перед їхньою обробкою. Такий підхід дозволяє зменшити вплив зовнішніх шумів і підвищити чутливість детектора до слабких сигналів, сприяючи кращому виявленню глибоко залеглих або малорозмірних об'єктів [8].

Інтеграція з геоінформаційними системами (ГІС) дозволяє візуалізувати місця знаходження об'єктів на карті, що є особливо корисним для гуманітарного розмінування, археологічних та геологічних досліджень. Це дозволяє точно планувати подальші дії на місцевості та аналізувати геодані в контексті інших досліджень.

Класифікація та ідентифікація прийнятих об'єктів є перспективним напрямком, що активно розвивається за допомогою алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для аналізу сигналів і класифікації та ідентифікації об'єктів. Останні дослідження показують, що інтеграція даної технології у металодетектори може допомогти класифікувати різні типи об'єктів, включаючи вибухонебезпечні об'єкти [9]. Ці технології значно покращують характеристики виявлення металодетекторів. Оскільки металошукачі зазвичай використовуються для польових досліджень як переносні системи, крім покращення обробки сигналів, важливими завданнями для покращення даного класу технологій є мініатюризація та зниження енергоспоживання.

За кількістю активних досліджень, що стосуються георадарного методу (GPR), можна зробити висновок, що на дану технологію припадає чи не найбільший потенціал для розвитку серед інших способів виявлення об'єктів у ґрунтів.

Основна перевага GPR полягає у здатності виявляти як і неметалеві, слабо металізовані так і металеві об'єкти. Найпоширеніші системи, що використовують GPR, включають ручні прилади, наземні транспортні засоби та, останнім часом, безпілотні літальні апарати (БПЛА).

На рис. 4 зображена схема роботи GPR. Даний пристрій включає такі основні компоненти: генератор імпульсів: відповідає за створення коротких електромагнітних імпульсів, які випромінюються у ґрунт через передавальну антену; передавач: включає передавальну антену, що випромінює електромагнітні імпульси в землю для взаємодії з різними матеріалами та структурами під поверхнею; приймач: включає приймальну антену, яка збирає відбиті сигнали від об'єктів під землею, створюючи сигнал для аналізу; аналізатор: обробляє прийняті сигнали, визначаючи характеристики та розташування об'єктів, включаючи глибину, форму та матеріал; блок індикації: відображає результати аналізу на візуальному інтерфейсі, надаючи користувачу інформацію для інтерпретації та подальших дій.

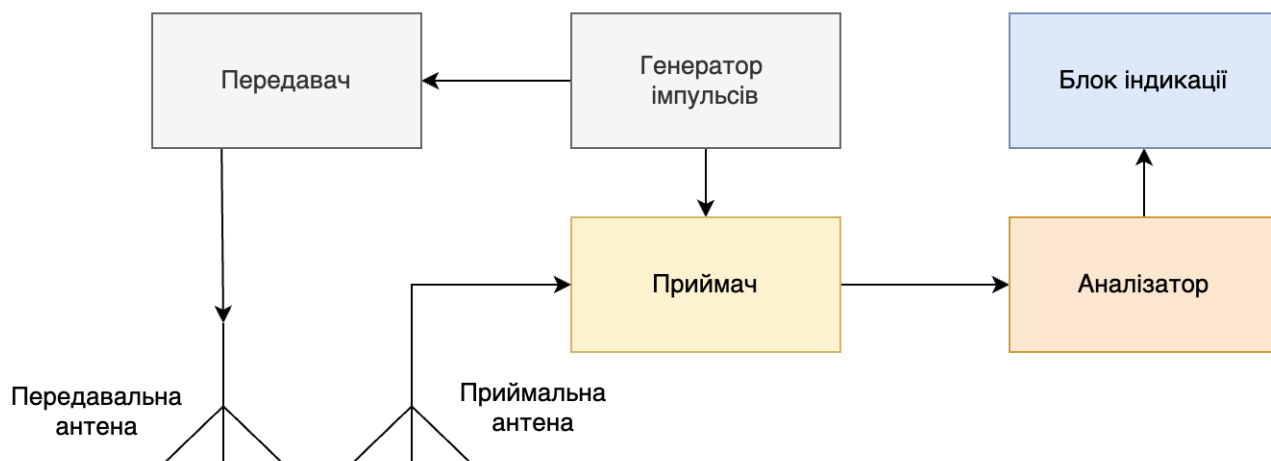


Рис. 4. Схема роботи GPR

Антену георадара, що складається з передавальних та приймальних елементів, розміщується на поверхні землі або досліджуваного матеріалу, або дуже близько до них, і переміщується для проведення сканування області. Шляхом постійного висилання імпульсів та реєстрації відповідних відбитків можна сформувати радіограму шару ґрунту і переглянути її у режимі реального часу на відповідному екрані (ПК/планшет).

У традиційних системах георадара застосовується метод «еквівалентної вибірки часу», що передбачає відправлення нового імпульсу з передавальної антени для кожного зчитування, яке реєструється приймачем. Такі системи відомі як звичайні георадари. Проте сучасні компоненти дозволяють застосовувати метод «вибірки в режимі реального часу» (RTS), який використовується в проектах, таких як Impulse Radar. Цей метод передбачає захоплення «реального» сигналу без повторення циклу передачі-запису, що дозволяє системі збирати дані значно швидше, ніж традиційні георадари [10].

Основними напрямками поточних досліджень для покращення точності розпізнавань є методи пов'язані з машинним навчанням, зокрема, метод машинного навчання з підкріпленням [11].

Одним з перспективних шляхів покращення якості розпізнавання об'єктів GPR радаром та металодетекторами у доповненні до машинного навчання є краще розуміння та

аналіз електромагнітних сигнатур наземних об'єктів у широкому діапазоні частот, починаючи з тих, що використовуються як для радарів, як правило, від кількох 100 МГц до кількох ГГц, так і для металодетекторів, від кількох кГц до десятків кГц.

Покращення в програмно-визначуваних радіостанціях (Software Defined Radios, SDR) показало, що окрім основного використання у галузі радіозв'язку, високі пропускні можливості також відкривають можливість реалізації радарів короткого радіуса дії для використання на БПЛА [12]. Основні інновації у цьому напрямку включають мінімізацію ваги та споживання енергії радарної системи для подовження часу польоту БПЛА або використання менших літальних апаратів; покращення чутливості радіочастотного переднього кінця, що знижує потребу у потужності для передачі радіочастот. Зокрема, було розроблено радар зі ступінчастою частотою неперервної хвилі (Stepped Frequency Continuous Wave, SFCW) з використанням удосконаленої архітектури супергетеродинного передавача, що поєднує аналогові та цифрові дизайнерські техніки на компактній друкованій платі (PCB). Це дозволяє незалежну роботу радарної системи, яка, разом з підходящим антенним розміщенням, ефективно виявляє міни навіть в умовах, коли поверхня покрита рослинністю [13].

Метод з використанням магнітометра (MAG) базується на вимірюванні магнітного поля навколо об'єктів, що можуть містити феромагнітні матеріали, як от металеві об'єкти. Основна ідея полягає в тому, що ці об'єкти змінюють магнітне поле навколо себе, і такі зміни можна виявити за допомогою магнітометричних вимірювань. Магнітометр реєструє магнітне поле в певній області, а аналіз магнітних аномалій дозволяє визначити зони, де можуть бути розташовані металеві об'єкти. Цей метод корисний для виявлення металевих об'єктів, оскільки вони часто взаємодіють з магнітним полем.

На рис. 5 зображена схема роботи магнітометричних пристроїв. Основним компонентом у пристроях даного типу є магнітометр. Дослідження та покращення магнітометричних сенсорів можуть значно покращити пристрої даного типу.

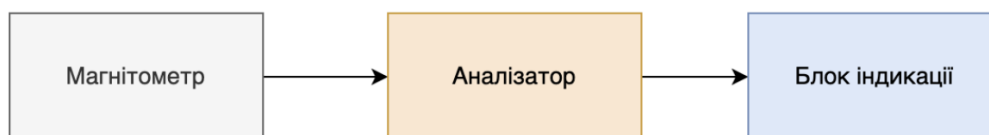


Рис. 5. Схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом магнітометрії

Важливим нововведенням є використання квантового магнітометра на базі кремнієвих спин-кубітів, який, згідно з патентом Pierre Gandolfo [14], демонструє значно підвищену чутливість та точність у вимірюванні магнітних полів.

Проте варто зауважити, що не всі вибухонебезпечні предмети мають феромагнітні складові, і можуть бути виготовлені з інших матеріалів, що ускладнює їх виявлення. Існують дослідження використання магнітометрів на безпілотних літальних апаратах для виявлення мін, реальні польові тести показали, що тривимірний флюкстейтовий магнітометр, розміщений на відстані 70 см від мотора дрона та утримуваний на висоті близько 1 метра, успішно виявив металеві протипіхотні (M16) та протитанкові (M15) міни. Також було виявлено міни з низьким металевим вмістом (M19), хоча міна з низьким металевим вмістом протипіхотного типу (M14) не була виявлена [15]. Для виявлення слабо металізованих об'єктів можуть бути використані сенсори типу TMR (магнітний тунельний сенсор). Відповідно до дослідження Van Thanh Pham та ін. дані сенсори демонструють можливість виявляти металеві об'єкти розмірами в декілька міліметрів [16].

Застосування пристроїв, що функціонують виключно на основі магнітометра, часто не забезпечує достатньої інформативності, особливо в контексті виявлення вибухонебезпечних пристроїв. Однак, інтеграція цих технологій з іншими детекційними методами може значно покращити результати. Дослідження Лі Юнghan та ін. якраз і демонструють вдалий приклад інтеграції сенсорів MAG із системою GPR на базі БПЛА [17]. Таким чином, майбутнє розвитку цієї технології для виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту має полягати у розробці нових сенсорів з підвищеною чутливістю та їх комплексній інтеграції з іншими видами детекторів.

Щодо методу лазерної доплерівської віброметрії (LDV), варто відзначити, що він використовується для контролю малорозмірних або тонкостінних об'єктів. Фотодетектори, такі як фотодіоди та фотопомножувачі, що входять до складу лазерних віброметрів, реагують на інтенсивність випромінювання. Для отримання інформації про частоту, фазу або поляризацію оптичного сигналу, що відбивається від об'єкта, використовуються різні оптичні дискримінатори та лінзи.

Лазерні доплерівські давачі вібрацій відображають концепцію безконтактного вимірювання з найбільшою повнотою. Доплерівське зміщення частоти, що виникає внаслідок випромінювання лазера на рухомих об'єктах або поверхнях, є добре вивченим явищем. Однак до появи лазерних джерел було обмежено можливість вимірювати високі швидкості через спектрометричні проблеми. Лазерне випромінювання, завдяки високій монохроматичності, має значно кращі параметри розповсюдження та інтенсивності пучка, порівняно з іншими джерелами. Це дозволяє вимірювати навіть менші поперечні розміри розсіяння з високим кутовим розділенням. Крім того, висока монохроматичність дозволяє використовувати такі методи обробки світлового сигналу, як гетеродинне детектування і вузько полосну фільтрацію.

На рис. 6 зображена схема роботи пристроїв, що працюють за методом лазерної віброметрії.

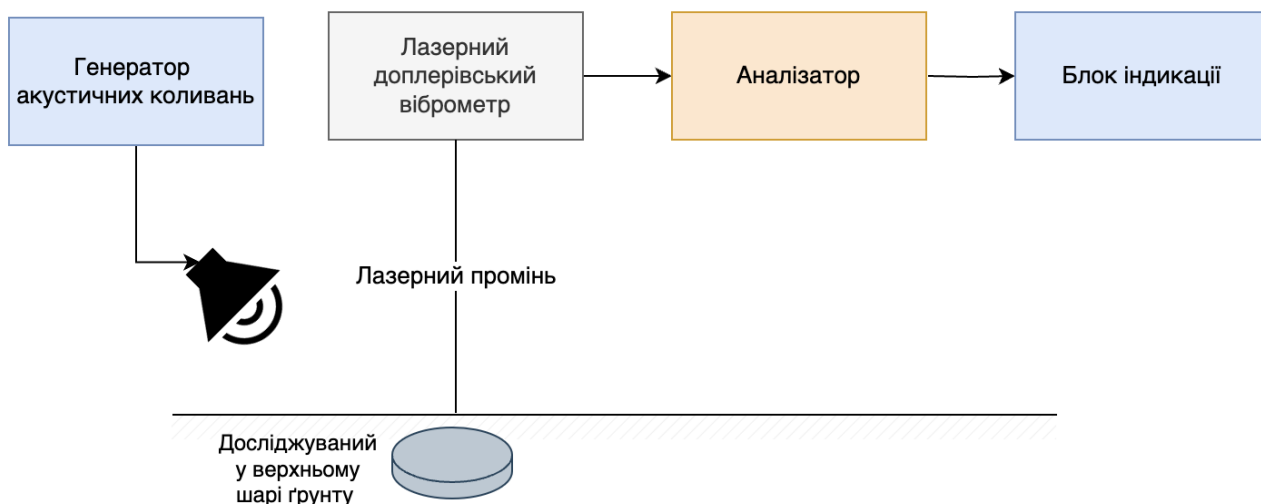


Рис. 6. Схема роботи пристроїв що працюють за принципом лазерної віброметрії

Переваги використання цього методу у виявленні об'єктів, прихованих у ґрунті, включають швидкість сканування та можливість виявлення різних типів об'єктів незалежно від їхніх матеріалів. Прискорення процесу сканування досягається за допомогою багатопроменевих доплерівських віброметрів (MB-LDV). Важливе дослідження, де було застосовано систему MB-LDV для сканування ділянки землі, продемонструвало високу ефективність цієї технології: експериментальна система швидко виявила всі об'єкти, що

підтверджує її здатність до ефективної та швидкої роботи [18]. Ці характеристики вказують на значний потенціал її застосування у галузі виявлення об'єктів під землею.

Оптичні методи є значущою групою технологій для виявлення об'єктів у верхніх шарах ґрунту. До таких методів належать лазерне сканування (LIDAR), мультиспектральний та гіперспектральний імеджінг, тепловізійна зйомка, а також використання оптичних датчиків. Хоча ці технології зазвичай не можуть використовуватися як самостійні для проникнення в ґрунт і візуалізації прихованих об'єктів, вони ефективні для виявлення нерівностей поверхні, різниці температур та частково прихованих об'єктів. Оптичні методи можуть бути особливо корисними в поєднанні з іншими технологіями для ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів, зокрема вибухових пристроїв. Інтеграція оптичного виявлення з безпілотними технологіями або застосування в наземних системах може значно підвищити безпеку операторів під час проведення досліджень.

Недавні дослідження показують значний прогрес у використанні оптичних технологій для виявлення вибухових об'єктів. Згідно з дослідженням, опублікованим Роров, Міхал та співавторами [19] (2021), комбінація оптичних даних з різних давачів, отриманих з БПЛА, дозволяє з високою точністю визначати місцеположення мін у верхніх шарах ґрунту. Це стає можливим завдяки статистичній обробці зображень для уточнення інтерпретації даних [19]. Додатково, дослідження, проведене Vivoli, Emanuele та іншими (2024), розробило інноваційну систему для реального часу виявлення мін, яка інтегрована у роботизований комплекс для розмінування. Ця система забезпечує високу швидкість обробки зображень (2.6 кадрів за секунду) та можливість керування через веб-переглядачі та мобільні пристрої, що підвищує її доступність та зручність використання в польових умовах [20].

Ці дослідження підкреслюють потенціал інтеграції різних оптичних технологій з сучасними системами аналізу даних для забезпечення ефективного та безпечного виявлення вибухонебезпечних предметів у різних умовах.

Висновки. У рамках проведеного дослідження було здійснено порівняльний аналіз сучасних технологій виявлення об'єктів у верхніх шарах ґрунту, включаючи георадари (GPR), металодетектори, лазерну доплерівську віброметрію, магнітометрію та оптичні методи. Аналіз показав, що кожен із цих методів має свої унікальні переваги та недоліки, залежно від типу об'єктів, які потрібно виявити, та умов, у яких вони застосовуються. Було встановлено, що інтеграція різних технологій може значно підвищити ефективність виявлення, особливо при використанні машинного навчання для обробки сигналів та класифікації об'єктів.

Ключовим аспектом сучасних досліджень є розвиток методів, які дозволяють зменшити масу та енергоспоживання приладів, щоб вони могли ефективно використовуватися на безпілотних наземних і літальних апаратах. Це стає все більш актуальним у контексті глобального зростання вимог до мобільності та автономності дослідницьких систем.

Алгоритми машинного навчання та створення баз даних сигнатур різних об'єктів відкривають значні можливості для покращення точності виявлення та мінімізації помилкових спрацювань. Ці технології здатні радикально трансформувати методики виявлення, забезпечуючи вищу надійність та точність при ідентифікації об'єктів у складних умовах.

Таким чином, подальші дослідження можуть бути зосереджені на наступних напрямках: інтеграція різних методів виявлення в єдину схему, що дозволить вирішити дану проблематику більш комплексно та багатовимірно, зокрема інтеграція оптичних систем з металодетекторами та GPR; розробка більш енергоефективних та мініатюрних систем на кристалах, які підвищують ефективність використання даних методів у безпілотних літальних апаратах; дослідження та вдосконалення сенсорів, таких як магнітометри для польових досліджень, що може значно підвищити їхню чутливість та точність вимірювань; побудова

масивів сенсорів та вдосконалення обробки сигналів, що сприятиме більш точному проведенню досліджень.

References

1. Bilshe chverti Ukrayiny vsteleno minamy: shcho vidomo [More than a quarter of Ukraine is covered with mines: what is known]. *Fakty = Facts*, 04.04.2024. URL: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240404-bilshe-chverti-ukrayiny-vsteleno-minamy-shho-vidomo/> [in Ukrainian].
2. Ukraine is now the most mined country. It will take decades to make safe. *The Washington Post*, 22.07.2023. URL: <https://www.washingtonpost.com/world/2023/07/22/ukraine-is-now-most-mined-country-it-will-take-decades-make-safe/>
3. Al-Bayati, A., Sturgill, R., Panzer, L., Shani, M. V., Omer, T. (2022). Locating underground utilities in the United States: A comparative analysis of services provided by private locators. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 16, 100707, DOI: 10.1016/j.trip.2022.100707.
4. Overton, G., Moreland, C. (2015). *Metal Detector*. 2nd ed. Corvallis, Oregon: Geotech Press. P. 13–16, 84, 143–146, 27, 69–73, 105–109.
5. Comparing VLF and PI Metal Detectors in Hot Mineralized Soil. *Kellyco Metal Detectors*. URL: <https://kellycodetectors.com/blog/comparing-vlf-and-pi-metal-detectors-in-hot-mineralized-soil/>
6. How Deep Can A Metal Detector Detect? URL: <https://metaldetectorfieldguide.com/deep-can-a-metal-detector-detect/>
7. Wang, Z., Jiang, H. J., Luo, Z. P., Zheng, F. F., Xiao, K. Z., Qu, S. H., Wu, M. W. (2023). Research on Metal Target Classification Method Based on Multi-Frequency Electromagnetic Induction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2447. P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/2447/1/012002.
8. Tang, Z. R., Carter, L. J. (2011). Metal detector head analysis. *Fifth International Conference on Sensing Technology*, Palmerston North, New Zealand. P. 93–96. DOI: 10.1109/ICSensT.2011.6137076.
9. Safatly, L., Baydoun, M., Alipour, M., Al Takach, A., Atab, K., Hussein, M., El-Hajj, A., Ghaziri, H. (2020). Detection and classification of landmines using machine learning applied to metal detector data. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, Vol. 33. P. 1–24. DOI: 10.1080/0952813X.2020.1735529.

Література

1. Більше чверті України встелено мінами: що відомо. *Факти*. 04.04.2024. URL: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240404-bilshe-chverti-ukrayiny-vsteleno-minamy-shho-vidomo/>
2. Ukraine is now the most mined country. It will take decades to make safe. *The Washington Post*. 22.07.2023. URL: <https://www.washingtonpost.com/world/2023/07/22/ukraine-is-now-most-mined-country-it-will-take-decades-make-safe/>
3. Al-Bayati A., Sturgill R., Panzer L., Shani M. V., Omer T. Locating underground utilities in the United States: A comparative analysis of services provided by private locators. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2022. No. 16. Art. 100707. DOI: 10.1016/j.trip.2022.100707.
4. Overton G., Moreland C. *Metal Detector*. 2nd ed. Corvallis, Oregon: Geotech Press, 2015.
5. Comparing VLF and PI Metal Detectors in Hot Mineralized Soil. *Kellyco Metal Detectors*. URL: <https://kellycodetectors.com/blog/comparing-vlf-and-pi-metal-detectors-in-hot-mineralized-soil/>
6. How Deep Can A Metal Detector Detect? URL: <https://metaldetectorfieldguide.com/deep-can-a-metal-detector-detect/>
7. Wang Z., Jiang H. J., Luo Z. P., Zheng F. F., Xiao K. Z., Qu S. H., Wu M. W. Research on Metal Target Classification Method Based on Multi-Frequency Electromagnetic Induction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. No. 2447. P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/2447/1/012002.
8. Tang Z. R., Carter L. J. Metal detector head analysis. *Fifth International Conference on Sensing Technology*. Palmerston North, New Zealand, 2011. P. 93-96, DOI: 10.1109/ICSensT.2011.6137076.
9. Safatly L., Baydoun M., Alipour M., Al Takach A., Atab K., Hussein M., El-Hajj A., Ghaziri H. Detection and classification of landmines using machine learning applied to metal detector data. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 2020. Vol. 33. P. 1–24. DOI: 10.1080/0952813X.2020.1735529.

10. Impulse Radar GPR Technology. *Impulse Radar*. URL: <https://impulseradargpr.com/technology/>
11. Alpdemir, M. N., Sezgin, M. (2024). A reinforcement learning (RL)-based hybrid method for ground penetrating radar (GPR)-driven buried object detection. *Neural Computing and Applications*, Vol. 36. DOI: 10.1007/s00521-024-09466-8.
12. Jendo, J., Pasternak, M. (2019). Ground penetrating radar prototype based on a low-cost software defined radio platform. Faculty of Electronics, Military University of Technology, Poland. DOI: 10.15199/48.2019.09.07.
13. Sipos, D., Gleich, D. (2020). A Lightweight and Low-Power UAV-Borne Ground Penetrating Radar Design for Landmine Detection. *Sensors*, Vol. 20, P. 2234. DOI: 10.3390/s20082234.
14. Silicon-based spin-qubit quantum magnetometer and radar system with all electrical control: pat. 11,894,475 USA: G01R. № 2024; Pierre Gandolfo; pub. 2024.
15. Yoo, L.-S., Lee, J. H., Ko, S.-H., Jung, S.-K., Lee, S.-H., Lee, Y.-K. (2020). A Drone Fitted With a Magnetometer Detects Landmines. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, P. 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2962062.
16. Pham, V. T., Lien, T. T. N., Nam, L. V. (2024). Design and Characteristics of Contactless Small-magnetic-metal Detector Base on Tunnel Magnetoresistance Sensors in Differential Circuit. *VNU Journal of Science: Mathematics – Physics*, Vol. 10. DOI: 10.25073/2588-1124/vnumap.4909.
17. Lee, J. H., Lee, H. S., Ko, S. P., Ji, D. H., Hyeon, J. W. (2023). Modeling and Implementation of a Joint Airborne Ground Penetrating Radar and Magnetometer System for Landmine Detection. *Remote Sensing*, Vol. 15, P. 3813. DOI: 10.3390/rs15153813.
18. Aranchuk, V., Lal, A., Zhang, H., Hess, C., Sabatier, J. (2004). Acoustic sensor for landmine detection using a continuously scanning multibeam LDV. *Proc SPIE*, 2004. DOI: 10.1117/12.541562.
19. Popov, M., Stankevich, S., Mosov, S., Titarenko, O., Topolnytskyi, M., Dugin, S. (2021). Landmine Detection with UAV-based Optical Data Fusion. P. 175–178. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.
20. Vivoli, E., Bertini, M., Capineri, L. (2024). Deep Learning-Based Real-Time Detection of Surface
10. Impulse Radar GPR Technology. *Impulse Radar*. URL: <https://impulseradargpr.com/technology/>
11. Alpdemir M. N., Sezgin M. A reinforcement learning (RL)-based hybrid method for ground penetrating radar (GPR)-driven buried object detection. *Neural Computing and Applications*. 2024. Vol. 36. DOI: 10.1007/s00521-024-09466-8.
12. Jendo J., Pasternak M. Ground penetrating radar prototype based on a low-cost software defined radio platform. Faculty of Electronics, Military University of Technology, Poland, 2019. DOI: 10.15199/48.2019.09.07.
13. Sipos D., Gleich D. A Lightweight and Low-Power UAV-Borne Ground Penetrating Radar Design for Landmine Detection. *Sensors*. 2020. Vol. 20. P. 2234. DOI: 10.3390/s20082234.
14. Silicon-based spin-qubit quantum magnetometer and radar system with all electrical control: pat. 11,894,475 USA: G01R. № 2024; Pierre Gandolfo; pub. 2024.
15. Yoo L.-S., Lee J. H., Ko S.-H., Jung S.-K., Lee S.-H., Lee Y.-K. A Drone Fitted With a Magnetometer Detects Landmines. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2962062.
16. Pham V. T., Lien T. T. N., Nam L. V. Design and Characteristics of Contactless Small-magnetic-metal Detector Base on Tunnel Magnetoresistance Sensors in Differential Circuit. *VNU Journal of Science: Mathematics – Physics*. 2024. Vol. 10. DOI: 10.25073/2588-1124/vnumap.4909.
17. Lee J. H., Lee H. S., Ko S. P., Ji D. H., Hyeon J. W. Modeling and Implementation of a Joint Airborne Ground Penetrating Radar and Magnetometer System for Landmine Detection. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. P. 3813. DOI: 10.3390/rs15153813.
18. Aranchuk V., Lal A., Zhang H., Hess C., Sabatier J. Acoustic sensor for landmine detection using a continuously scanning multibeam LDV. *Proc SPIE*. 2004. DOI: 10.1117/12.541562.
19. Popov M., Stankevich S., Mosov S., Titarenko O., Topolnytskyi M., Dugin S. Landmine Detection with UAV-based Optical Data Fusion. 2021. P. 175–178. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.
20. Vivoli E., Bertini M., Capineri L. Deep Learning-Based Real-Time Detection of

Landmines Using Optical Imaging. *Remote Sensing*,
Vol. 16, P. 677. DOI: 10.3390/rs16040677.

Surface Landmines Using Optical Imaging.
Remote Sensing. 2024. Vol. 16. P. 677. DOI:
10.3390/rs16040677

VINTONIAK VITALII

PhD Student, Department of Computer Engineering and Electronics,
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-1538-1881>
E-mail: vitalii.vintoniak.23a@pnu.edu.ua

VINTONIAK V. M.

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

**INNOVATIONS IN ELECTRONICS FOR DETECTING OBJECTS
IN SURFACE LAYERS OF SOIL: A REVIEW OF METHODS
AND DIRECTIONS FOR FURTHER IMPROVEMENT**

Purpose. *The research in this publication reveals a comprehensive analysis of modern electronic technologies for detecting objects in the surface layers of the ground, assessing their efficiency and accuracy, and identifying promising areas for further innovation and research in this area.*

Methodology. *To achieve the research objectives, the theoretical analysis of scientific literature, as well as methods of analyzing and summarizing existing data were used. The main research tools were a comparative analysis and classification of the methods used to detect objects in the surface layers of the ground. The solution of scientific problems was carried out using a systematic approach to the selection of materials, the use of inductive and logical analysis, and observation methods to analyze information obtained from the literature.*

Findings. *The study analyzed the main technologies for detecting objects in the upper layers of the ground: ground penetrating radar (GPR), metal detectors, laser Doppler vibrometry, magnetometry, and optical methods. It was found that the combination of different technologies can significantly improve the accuracy and efficiency of object detection. This work also highlighted the potential of applying machine learning to improve object classification and reduce false positives. Further, it was found that reducing the weight and power consumption of detection systems can facilitate their use on unmanned vehicles, which opens up new prospects for the use of these technologies in remote monitoring and exploration of hard-to-reach areas.*

Originality. *This paper is the first to systematize and analyze in detail the existing technologies for detecting objects in the upper layers of the ground, including GPR, metal detectors, laser vibrometry, magnetometry, and optical methods, based on criteria such as detection depth, equipment cost, and the possibility of integration with other systems. This comprehensive approach allows us to identify white spots in current research and identify areas for further development of each method, including improving accuracy, reducing power consumption and weight of devices for more efficient use on UAVs and ground operations.*

Practical value. *Comparison results of such electronic technologies as GPR, metal detectors, laser vibrometry, multispectral imaging have been obtained. The current trends in the development of these technologies and opportunities for further research have been identified.*

Keywords: *metal detector; magnetometry; GPR; ground penetrating radar; landmine; optical methods; laser vibrometry.*

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.2>

УДК 621.382

ДЕНІСОВ Р. В., ПОПОВИЧ П. В.

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

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА МІКРОКОНТРОЛЕРАХ З ПОДАЛЬШИМ ГОЛОСОВИМ ВИВОДОМ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ

Мета. Дослідження мінімального і максимального часу необхідного на проходження одного повного циклу розпізнавання-оголошення назви об'єкту з урахуванням різної довжини слів, різної швидкості розпізнавання об'єктів, а також фізичних особливостей людей з вадами зору для систем розпізнавання об'єктів у режимі реального часу на мікроконтролерах з подальшим голосовим виводом.

Методика. Створення варіантів комбінацій слів різної довжини з урахуванням можливості задання швидкості генерації мови у *Espeak*, та середньої швидкості мови в Україні. Розрахунок мінімальної і максимальної відстані до об'єкту на момент початку циклу розпізнавання-оголошення. Встановлено мінімальний і максимальний час необхідний на повний цикл розпізнавання-оголошення назви об'єкту.

Результати. На базі синтезатора мови *Espeak* та особливостях Українсько мови та мовлення було досліджено час необхідний для оголошення назв об'єктів різної довжини. Встановлено мінімальний та максимальний час проходження повного циклу розпізнавання-оголошення інформації з урахуванням фізичних особливостей людей з вадами зору, швидкості їх руху та швидкості реакції на голосову інформацію. Також отримано мінімальну і максимальну відстань до об'єкту на момент початку циклу, в залежності від часу необхідного на проходження одного повного циклу.

Наукова новизна. Отримано мінімальний і максимальний час необхідний на проходження повного циклу розпізнавання-оголошення інформації з урахуванням фізичних особливостей людей з вадами зору, технічних можливостей сучасних нейронних мереж та програм для синтезу мови, а також мінімальну і максимальну відстань до об'єкту на момент початку циклу. Досліджено мінімальну і максимальну відстань до об'єкту на момент початку циклу розпізнавання-оголошення.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані при практичному створенні систем онлайн розпізнавання об'єктів, для оцінки можливості застосування тих чи інших нейронних мереж, спираючись на отриманий мінімальний та максимальний час проходження повного циклу розпізнавання-оголошення інформації, а також часу необхідного для проходження кожного з його окремих елементів.

Ключові слова: системи розпізнавання зображень; мікроконтролери; голосовий вивід інформації; згорткові нейронні мережі; *TensorFlow*; *Espeak*; *MobileNet*.

Вступ. Активний розвиток нейронних мереж відкрив нові можливості для практичного застосування систем розпізнавання об'єктів, особливо у режимі реального часу. Медичні дослідження, системи автопілотування, робототехніка та комп'ютерний зір є основними напрямками досліджень і розвитку таких систем. При цьому, як для навчання так і для подальшого використання необхідні досить великі обчислювальні потужності [1–3].

Водночас, системи розпізнавання об'єктів на мікроконтролерах при високих показниках точності і швидкості розпізнавання потребують значно меншої кількості тренувальних даних і обчислювальної потужності для виконання розпізнавання [4–6]. Також, однією з основних переваг мікроконтролерів є компактність самих пристроїв, що дозволяє їх активно застосовувати для створення приладів які може носити людина.

Часткова або повна втрата зору є актуальною проблемою сьогодення, враховуючи кількість факторів, що можуть її спричинити. Використання нейронних мереж у системах розпізнавання об'єктів у режимі реального часу на мікроконтролері в поєднанні з подальшим

голосовим виводом розпізнаної інформації можуть допомогти людині в орієнтуванні у просторі, розпізнаванні об'єктів, що знаходяться перед нею, читанні тексту тощо.

Основні складнощі, які при цьому виникають, пов'язані з визначенням діапазонів технічних параметрів які необхідно врахувати, включно з фізичними особливостями людей з вадами зору, щоб розпізнана інформація була вчасно оголошена, і людина встигла на неї відреагувати. Адже різниця у часі необхідному на оголошення назви об'єкту на пряму залежить від кількості слів і букв у ній, а також швидкості розпізнавання об'єкту нейронною мережею.

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення часу необхідного для проходження циклу розпізнавання-оголошення інформації з урахуванням різної довжини слів, швидкості руху та реакції людини, та різного часу необхідного на розпізнавання об'єкту. А також визначення мінімальної та максимальної відстані на якій необхідно починати оголошувати інформацію та частоту її оновлення.

Для здійснення розрахунків необхідно:

- визначити мінімальний і максимально час проходження одного циклу розпізнавання-оголошення
- визначити час необхідний на оголошення різних варіантів назв об'єктів в залежності від кількості слів і знаків у них
- встановити мінімальну і максимальну відстань до об'єкту на момент початку процесу розпізнавання-оголошення з урахуванням фізичних особливостей людей з вадами зору, швидкості розпізнавання об'єктів та часу необхідного на оголошення назви об'єктів, з врахуванням різної кількості букв і слів у цій назві, а також попереджувального слова.

Моя робота пропонує переглянути підхід до створення пристроїв що мають допомогти людям які втратили зір спираючись на їх фізичні особливості включно з швидкістю реакції та швидкістю руху. Також метою роботи є визначення мінімальної та максимальної відстані до об'єкту на момент початку циклу розпізнавання-оголошення.

Результати попередніх досліджень. Системи розпізнавання об'єктів у режимі реального часу набувають активного розвитку завдяки нейронним мережам. У роботі з визначення потоку машин у режимі реального часу було використано нейронну мережу YOLOX-L, як детектор, з використанням восьми графічних відеокарт GTX 2080ti для навчання системи. Час обробки вимірювали на графічному процесорі Tesla V100 [7].

У роботі з виявлення поліпів в режимі реального часу було використано архітектуру YOLOv3. Тести розпізнавань виконувались на ПК з процесором AMD Ryzen 5 2600 з частотою 3,4 ГГц, 16 Гб оперативної пам'яті, графічним процесором NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti 11 Гб для виявлення поліпів і графічним процесором NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti, як основний GPU для операційної системи [8].

Можливість розгортання нейронних мереж на мікроконтролерах відкрило нові сфери для застосування таких систем, у тому числі і для створення пристроїв, що мають покращити життя людям які втратили зір. Так у роботі з створення розумного капелюха для людей із вадами зору було представлено систему, що працює на модулі Raspberry Pi 4, нейронній мережі під назвою SSD MobileNet v2 320x320, із використанням TensorFlow Lite 2 для виявлення об'єктів. Швидкість аналізу моделі досягає близько 5 кадрів в секунду на Raspberry Pi 4 [9].

У роботі з розпізнавання об'єктів на основі глибокого навчання та опису навколишнього середовища для людей із вадами зору було використано модель SSD Lite MobileNetV2 модуль синтезу мовлення Google, PyAudio та відеокамеру з мікроконтролером Raspberry Pi 4B. Отримана система може виявляти різні звичайні об'єкти із задовільною точністю 88,89% і швидкістю аналізу моделі у 2,15 кадри на секунду [10].

Основний акцент у цих роботах було зроблено на навчанні нейронних мереж і перевірки точності розпізнавання об'єктів. Але, для того, щоб розуміти які з існуючих нейронних мереж та систем голосового виводу для мікроконтролерів можна практично застосовувати системам онлайн розпізнавання об'єктів з подальшим голосовим виводом необхідно визначити як загальний час процесу розпізнавання-оголошення інформації, так і часові діапазони кожної окремої ланки з урахуванням фізичних особливостей людей з вадами зору, їх швидкості руху і швидкості реакції на голосову інформацію.

Далі наведено опис, умови проведення експерименту та власне його результати.

Основні нейронні мережі доступні для мікроконтролерів.

На даний момент найбільш прогресивні і доступні для практичного застосування на мікроконтролері нейронні мережі це – група моделей мереж від компанії Google – MobileNet, та TensorFlow Lite – від платформи TensorFlow.

MobileNet – це архітектура нейронної мережі, розроблена спеціально для використання на мобільних та вбудованих пристроях з обмеженими ресурсам. Основна ідея архітектури MobileNet полягає у тому, щоб забезпечити високу точність класифікації та виявлення об'єктів при мінімальному споживанні обчислювальних ресурсів та пам'яті.

MobileNetV1 та MobileNetV2 – дві основні моделі, що мають глобальну підтримку і оновлення. MobileNetV1 базується на двошаровій згортці, що дозволяє значно зменшити кількість параметрів та обчислень, зберігаючи при цьому високу точність розпізнавання [11]. Також за допомогою коефіцієнтів ширини мережі і зміни розміру вхідного зображення можна отримувати різну ефективність розпізнавання і кількість пам'яті необхідну для розгортання мережі.

MobileNetV2 – покращена версія, що базується на MobileNetV1 із додаванням інвертованого залишкового блоку з лінійними вузькими місцями, що зменшують розмір вхідних даних [12]. Така структура дозволила підвищити точність і швидкість розпізнавання об'єктів при зменшенні розміру самої моделі.

TensorFlow Lite – це оптимізована версія фреймворку машинного навчання TensorFlow, призначена для роботи на пристроях з обмеженими ресурсами [13]. Конвертер TensorFlow Lite: дозволяє перетворювати звичайні TensorFlow моделі в оптимізований формат TensorFlow Lite FlatBuffer, включаючи оптимізації, такі як квантизація, що сприяє зменшенню розміру моделі та підвищує швидкість розпізнавання.

Ядро TensorFlow Lite виконує інференцію з оптимізованими моделями, взаємодіючи з різними операціями виконання через простий API. Можуть бути використані різні акселератори обчислень, такі як CPU, GPU, і спеціалізовані апаратні блоки. TensorFlow Lite використовує оптимізовані бібліотеки для обчислень, такі як Eigen (для CPU) та GPU kernels, що дозволяють максимально ефективно використовувати апаратні ресурси пристрою.

Платформа TensorFlow також дозволяє інтегрувати моделі класу MobileNet, виконати їх технічну оптимізацію, а також стиснення моделі.

Основні генератори мовлення доступні для мікроконтролерів.

Для використання на мікроконтролері на даний момент доступні і підтримуються такі синтезатори мови як Espeak, PicoTTS та Flite (Festival Lite).

Espeak – це компактний і простий у використанні синтезатор мови (Text-to-Speech, TTS) має низькі вимоги до ресурсів що дозволяє розгортати його на пристроях з обмеженими ресурсами [14]. ESpeak дозволяє користувачеві налаштувати такі параметри синтезу мови як: швидкість мовлення, висота голосу, рівень гучності та акцент, використовуючи різні алгоритми синтезу мови, включаючи формантний синтез та конкатенативний синтез. Підтримує Українську мову.

PicoTTS – синтезатор мови розроблений компанією SVOX [15]. Працює під відкритою ліцензією Apache License 2.0. PicoTTS, використовує конкатенативний синтез мови, складаючи реальні аудіофрагменти (частини слів або фраз) для генерації мовлення. Підтримує різні мови та акценти, у тому числі Українську.

Flite (Festival Lite) – це компактний і легкий синтезатор мови (Text-to-Speech, TTS), який є спрощеною версією системи синтезу мови Festival. Flite, використовує конкатенативний синтез мови, підтримує різні мови та акценти, розповсюджується під відкритою ліцензією та є вільним програмним забезпеченням [16].

Враховуючи, що Espeak має досить гнучкі параметри налаштувань і чудово адаптований для застосування на мікроконтролерах, а також підтримує Українську мову, для розрахунків було обрано саме його.

Оцінка часу необхідного для проходження процесу розпізнавання-оголошення інформації з урахуванням фізичних особливостей людей які втратили зір.

Для оцінки часу необхідного для проходження циклу розпізнавання-оголошення інформації спершу необхідно встановити основні складові цього процесу, а також їх особливості. У загальному випадку цей процес складається з таких складових :

- Розпізнавання об'єктів
- Передача розпізнаної інформації до генератора мови
- Генерація і оголошення отриманого результату
- Отримання інформації людиною і реакція на неї.

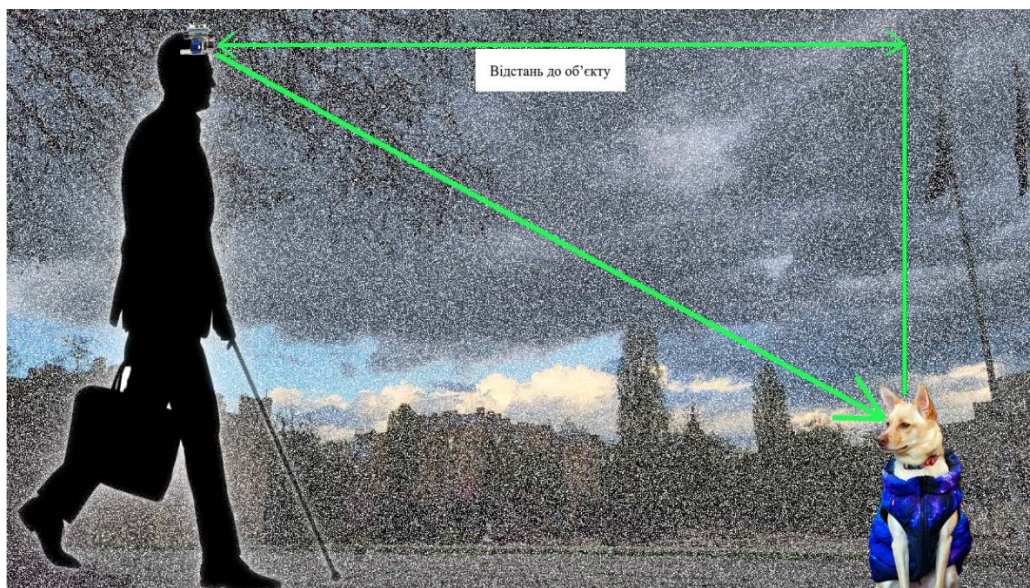


Рис. 1. Умовне зображення процесу розпізнавання-оголошення

На рис. 1 представлено умовне зображення процесу розпізнавання-оголошення. Кожна складова цього процесу має свої особливості і діапазони часу необхідні на їх виконання. Враховуючи, що час необхідний для оголошення інформації є складовою яку можна прорахувати і отримати діапазон часу в залежності від довжини і кількості слів, для розрахунку часу було обрано синтезатор мови Espeak. Він дозволяє задавати вручну такі технічні параметри як :

- базову висоту голосу у Гц та її діапазон;
- число формант, їх частоту, ширину і силу резонансних піків голосу;
- затримку (від 0 до 250 мс) та амплітуду ехо-сигналу;

- параметри звучання мови;
- швидкість мови у вигляді кількості слів на хвилину (від 80 до 450).

Аналіз результатів експерименту. В даному розділі наведено результати проведених досліджень.

Для розрахунку кількості часу необхідного для оголошення назви об'єкту необхідно розглянути можливі комбінації в залежності від кількості слів та їх довжини. Дослідження показують, що середній темп мовлення в Україні складає 5,5 складів на секунду (200 слів на хвилину), середня довжина Українських слів становить 6-8 символів, а оптимальна затримка (пауза) між словами складає 200 мс [17]. Можливі варіанти назв об'єктів – назва об'єкту складається з одного слова, назва складається з двох слів, варіант коли перед назвою об'єкту додається попереджувальне слово «попереду», а також словосполучення «нерозпізнаний об'єкт» у випадку коли об'єкт не було розпізнано.

Для зручності розрахунків було переведено швидкість мовлення з слів на хвилину до символів на секунду з врахування особливостей Української мови. При швидкості у 200 слів на хвилину отримуємо приблизно 3 слова на секунду. Взявши середню кількість символів у слові за 7, отримуємо швидкість у 21 символ на секунду, або приблизно 48 мс на оголошення одного символу. Також, при розрахунку назв, що складається з двох слів необхідно враховувати паузу між кожним словом, що складає в середньому 200 мс для Української мови. Для подальших розрахунків врахуємо, що у випадку коли назва об'єкту складається з одного слова, воно може бути коротким, середньостатистичним(середнім) або довгим. Коротким будемо вважати слово довжиною у 3–5 символи, середнє з довжиною у 6–8, та довге з довжиною у 9–12 символів. У ситуації коли назва об'єкту складається з двох слів – це можуть бути комбінації з двох коротких слів (к-к), короткого та середнього (к-с), короткого та довгого (к-д), двох середніх (с-с), середнього та довгого (с-д), або двох довгих (д-д). Враховуючи час необхідний на оголошення одного символу у 48 мс можна розрахувати час необхідний на оголошення слів різної довжини. У таблиці 1 представлено мінімальний, максимальний та середній час необхідний на оголошення назви об'єкту, що складається з одного слова.

Таблиця 1

Час необхідний на оголошення одного слова різної довжини

Назва об'єкту	Мінімальний час, мс	Максимальний час, мс	Середній час, мс
Коротка	144	240	192
Середня	288	384	336
Довга	432	576	504

У таблиці 2 наведено мінімальний, максимальний та середній час необхідний на оголошення назви об'єкту, яка складається з двох слів та їх можливі комбінації. Час вказаний без врахування паузи між словами у 200 мс.

Таблиця 2

Час необхідний на оголошення двох слів різної довжини

Комбінація слів	Мінімальний час, мс	Максимальний час, мс	Середній час, мс
К-К	288	480	384
К-С	432	624	528
К-Д	576	816	696
С-С	576	768	672
С-Д	720	960	840
Д-Д	864	1152	1008

З отриманих результатів можна зробити висновки, що час необхідний на оголошення може сильно відрізнятись в залежності від кількості слів та їх довжини, від 144 мс для короткого слова, наприклад «кіт», і максимальний час для двох довгих слів у 1,152 с.

Для допоміжного слова «попереду» необхідно 384 мс, а також 200 мс затримки між словами. Час необхідний для оголошення словосполучення «нерозпізнаний об'єкт» становить 1064 мс. Таким чином мінімальний час необхідний для назви об'єкту становить 144 мс без слова «попереду», і 728 мс з ним та затримкою. Максимальний час необхідний для назви об'єкту, що складається з двох довгих слів становить 1352 мс, і 1936 мс з урахуванням попереджувального слова та пауз між словами.

Швидкість розпізнавання об'єктів залежить від таких складових як – нейронна мережа, що використовується для розпізнання, апаратні можливості мікроконтролера – чим більше пам'яті доступної для використання тим менш стиснуту нейронну мережу можна застосувати і отримати кращі показники швидкості і точності розпізнавання, а також від зовнішніх умов, таких як освітленість та погодні умови. Якщо вірогідність розпізнавання об'єкту вище за 60% – результат можна вважати позитивним і оголосити назву об'єкту, у іншому випадку буде оголошено інформацію у форматі словосполучення «нерозпізнаний об'єкт». Враховуючи, що середній час розпізнавання об'єктів нейронними мережами може варіюватися в залежності від різних умов, для подальших розрахунків було обрано мінімальний час розпізнавання 600 мс, середній час розпізнавання у 900 мс та 1200 мс для складних умов розпізнавання.

Отже, загальний час ($t_{ц}$) необхідний на один повний цикл процесу розпізнавання-оголошення назви розпізнаного об'єкту можна розрахувати за формулою:

$$t_{ц} = t_{роз} + t_{назви} + t_{реакції} \quad (1)$$

де $t_{роз}$ – час необхідний на розпізнавання об'єкту; $t_{назви}$ – час необхідний на оголошення назви об'єкту; $t_{реакції}$ – час реакції людини на голосову інформацію (160 мс). Таким чином, при мінімальному часі розпізнавання та найкоротшій назві об'єкту час буде складати 904 мс, та 3296 мс при максимальному часі розпізнавання та довгій назві об'єкту. Частота проходження циклів при цьому суттєво відрізняється. У випадку мінімального часу це виходить 1 повний цикл на секунду, а при максимальному часі необхідно більше 3 повних секунд на проходження одного циклу.

Враховуючи середню швидкість руху людей з вадами зору у незнайомій місцевості як 2.5 км/год, або 0.7 м/с ($V_{л}$), а також знаючи максимальний та мінімальний час необхідний на проходження одного циклу ($t_{ц}$) розпізнавання-оголошення назви об'єкту можна розрахувати мінімальну та максимальну відстань (S) на якій необхідно починати процес розпізнавання-оголошення за формулою:

$$S = V_{л} \times t_{ц} \quad (2)$$

Мінімальна відстань при швидкості руху 0,7 м/с швидкості реакції 160 мс та мінімальним часом необхідним на цикл розпізнавання-оголошення 904 мс становить 0,63 м, а максимальна відстань 2,31 м для довгої назви об'єкту з урахуванням попереджувального слова та найбільшого часу розпізнавання.

У випадку нерозпізнаного об'єкту, мінімальна відстань при найменшому часі розпізнавання становить 0,92 м, і 1,54 м при найбільшому часі розпізнавання.

Проаналізувавши отримані результати можна зробити висновки, що час необхідний на оголошення назви об'єкту в залежності від кількості слів та букв у них суттєво впливає на загальний час циклу розпізнавання-оголошення. Різниця між максимальною назвою з двох довгих слів і мінімальною назвою з одного короткого слова складає 1008 мс, без урахування попереджувального слова, а час необхідний для оголошення нерозпізнаного об'єкту складає

1064 мс. Різниця у відстані на якій потрібно починати цикл розпізнавання-оголошення варіюється від 0,63 м до 2,31 м, що є досить суттєво.

Враховуючи фізичні особливості людей з вадами зору для реального застосування необхідно враховувати як максимальну з отриманих відстаней, щоб врахувати найгірші умови розпізнавання об'єкту та найдовшу назву об'єкту, що складається з декількох слів і попереджувального слова перед ним, так і мінімальну відстань у випадку коли об'єкти мають коротку назву з одного слова.

Висновки. Проведено дослідження необхідного часу на один цикл процесу розпізнавання-оголошення назви об'єкту для систем розпізнавання об'єктів у реальному часі для систем на мікроконтролерах з врахуванням особливостей кожного елементу цього процесу та фізичних особливостей людей з вадами зору. Встановлено мінімальний та максимальний час необхідний на оголошення назви об'єкту з врахуванням різної довжини слів і їх можливих комбінацій, а також час необхідний для словосполучення «нерозпізнаний об'єкт».

Також отримано мінімальний та максимальний час необхідний на один повний цикл процесу розпізнавання-оголошення з урахуванням різної швидкості розпізнавання об'єкту, часу необхідного на його оголошення, швидкості руху та реакції людини, що цю інформацію отримує. А також мінімальну та максимальну відстань до об'єкту на момент початку процесу розпізнавання.

Отримані результати показують, що частота проходження одного повного циклу може варіюватися від одного циклу на секунду до понад трьох секунд на один цикл у випадку назви об'єкту, що складається з двох слів та попереджувального слова, а також найдовшого часу розпізнавання. При цьому, для практичного застосування необхідно враховувати як максимальний час проходження одного повного циклу так і мінімальний, щоб уникнути ситуацій коли людина не встигає зреагувати на отриману інформацію, або об'єкти знаходяться один за одним на малій відстані.

References

1. Zheng, X., Chen, F., Lou, L., Cheng, P., Huang, Y. (2022). Real-Time Detection of Full-Scale Forest Fire Smoke Based on Deep Convolution Neural Network. *Remote Sens*, 14(3), 536. <https://doi.org/10.3390/rs14030536>.
2. Mahendru, M., Dubey, S. K. (2021). Real Time Object Detection with Audio Feedback using Yolo vs. Yolo_v3. *2021 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)*, Noida, India, 2021, P. 734–740, DOI: 10.1109/Confluence51648.2021.9377064.
3. Rahman, S., Rony, J. H., Uddin, J., Samad, M. A. (2023). Real-Time Obstacle Detection with YOLOv8 in a WSN Using UAV Aerial Photography. *J. Imaging*, 9(10), 216. <https://doi.org/10.3390/jimaging9100216>.
4. Moosmann, J., Giordano, M., Vogt, C., Magno, M. (2023). TinyissimoYOLO: A Quantized, Low-Memory Footprint, TinyML Object Detection Network for Low Power Microcontrollers. *2023 IEEE 5th International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS)*, Hangzhou, China, 2023, P. 1–5, DOI: 10.1109/AICAS57966.2023.10168657

Література

1. Zheng X., Chen F., Lou L., Cheng P., Huang Y. Real-Time Detection of Full-Scale Forest Fire Smoke Based on Deep Convolution Neural Network. *Remote Sens*. 2022. Vol. 14(3). Art. 536. <https://doi.org/10.3390/rs14030536>.
2. Mahendru M., Dubey S. K. Real Time Object Detection with Audio Feedback using Yolo vs. Yolo_v3. *2021 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)*. Noida, India, 2021. P. 734–740. DOI: 10.1109/Confluence51648.2021.9377064.
3. Rahman S., Rony J. H., Uddin J., Samad M. A. Real-Time Obstacle Detection with YOLOv8 in a WSN Using UAV Aerial Photography. *J. Imaging*. 2023. No. 9 (10). Art. 216. <https://doi.org/10.3390/jimaging9100216>.
4. Moosmann J., Giordano M., Vogt C., Magno M. TinyissimoYOLO: A Quantized, Low-Memory Footprint, TinyML Object Detection Network for Low Power Microcontrollers. *2023 IEEE 5th International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS)*,

5. Wulfert, L., Wiede, C., Verbunt, M. H., Gembaczka, P., Grabmaier, A. (2022). Human Detection with A Feedforward Neural Network for Small Microcontrollers. *2022 7th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP)*, Paris, France, 2022, P. 14–22, DOI: 10.1109/ICFSP55781.2022.9924667.
6. Umayer-Murshed, R., Dhruba, S. K., Bhuiyan, M. T. I., Akter, M. R. (2022). Automated Level Crossing System: A Computer Vision Based Approach with Raspberry Pi Microcontroller. *2022 12th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, Dhaka, Bangladesh, 2022, P. 180–183, DOI: 10.1109/ICECE57408.2022.10089007.
7. Jinrong Yang, Songtao Liu, Zeming Li, Xiaoping Li, Jian Sun (2022). Real-Time Object Detection for Streaming Perception. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, P. 5385–5395, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.12338>.
8. Nogueira-Rodríguez, A., Domínguez-Carbajales, R., Campos-Tato, F. et al. (2022). Real-time polyp detection model using convolutional neural networks. *Neural Comput & Applic*, 34, 10375–10396. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06496-4>.
9. Matshehla Konaite, Pius A. Owolawi, Temitope Mapayi, Vusi Malele, Kehinde Odeyemi, Gbolahan Aiyetoro, and Joseph S. Ojo (2021). Smart Hat for the blind with Real-Time Object Detection using Raspberry Pi and TensorFlow Lite. In: *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and its Applications (icARTi '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 6. <https://doi.org/10.1145/3487923.3487929>.
10. Raihan Bin Islam, Samiha Akhter, Faria Iqbal, Md. Saif Ur Rahman, Riasat Khan (2023). Deep learning based object detection and surrounding environment description for visually impaired people. *Heliyon*, Vol. 9, Iss. 6, e16924. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16924>.
11. Howard, G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T. et al. (2017). Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv preprint arXiv*, 2017, P. 1–9. DOI: 10.48550/arXiv.1704.04861.
- Hangzhou, China, 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/AICAS57966.2023.10168657.
5. Wulfert L., Wiede C., Verbunt M. H., Gembaczka P., Grabmaier A. Human Detection with A Feedforward Neural Network for Small Microcontrollers. *2022 7th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP)*, Paris, France, 2022. P. 14–22. DOI: 10.1109/ICFSP55781.2022.9924667.
6. Umayer-Murshed R., Dhruba S. K., Bhuiyan M. T. I., Akter M. R. Automated Level Crossing System: A Computer Vision Based Approach with Raspberry Pi Microcontroller. *2022 12th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, Dhaka, Bangladesh, 2022. P. 180–183. DOI: 10.1109/ICECE57408.2022.10089007.
7. Jinrong Yang, Songtao Liu, Zeming Li, Xiaoping Li, Jian Sun. Real-Time Object Detection for Streaming Perception. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022. P. 5385–5395. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.12338>.
8. Nogueira-Rodríguez A., Domínguez-Carbajales R., Campos-Tato F. et al. Real-time polyp detection model using convolutional neural networks. *Neural Comput & Applic*. 2022. No. 34. P. 10375–10396. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06496-4>.
9. Matshehla Konaite, Pius A. Owolawi, Temitope Mapayi, Vusi Malele, Kehinde Odeyemi, Gbolahan Aiyetoro, Joseph S. Ojo. Smart Hat for the blind with Real-Time Object Detection using Raspberry Pi and TensorFlow Lite. In: *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and its Applications (icARTi '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 2021. Article 6. <https://doi.org/10.1145/3487923.3487929>.
10. Raihan Bin Islam, Samiha Akhter, Faria Iqbal, Md. Saif Ur Rahman, Riasat Khan. Deep learning based object detection and surrounding environment description for visually impaired people. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, Iss. 6. e16924. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16924>.
11. Howard G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T. et al. Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv preprint arXiv*. 2017. P. 1–9. DOI: 10.48550/arXiv.1704.04861.

12. Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., Chen, L.-C. (2018). MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, P. 4510–4520. DOI: 10.1109/ CVPR.2018.00474.
13. TensorFlow Lite. *tensorflow.org/lite*. URL: <https://www.tensorflow.org/lite>.
14. Espeak. *espeak.sourceforge.net*. URL: <https://espeak.sourceforge.net/>
15. PicoTTS. URL: <https://www.home-assistant.io/integrations/picotts/>
16. Flite (Festival Lite). *cmuflite.org* URL : <http://cmuflite.org/>
17. Ishchenko, O. S. (2012). Holosni zvuky ukrainskoi movy zalezno vid tempu movlennia: monohrafiia [Vowel sounds of the Ukrainian language depending on the tempo of speech: monograph]. Kyiv: Institute of the Ukrainian Language of the National Academy of Sciences of Ukraine. P. 109–119 [in Ukrainian].
12. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L.-C. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. P. 4510–4520. DOI: 10.1109/ CVPR.2018.00474.
13. TensorFlow Lite. *tensorflow.org/lite*. URL: <https://www.tensorflow.org/lite>.
14. Espeak. *espeak.sourceforge.net*. URL: <https://espeak.sourceforge.net/>
15. PicoTTS. URL: <https://www.home-assistant.io/integrations/picotts/>
16. Flite (Festival Lite). *cmuflite.org*. URL: <http://cmuflite.org/>
17. Іщенко О. С. Голосні звуки української мови залежно від темпу мовлення: монографія. К.: Інститут української мови НАН України, 2012. С. 109–119.

DENISOV ROSTYSLAV

Post graduate student,
Department of Acoustic and
Multimedia Electronic Systems,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1146-9114>
E-mail: rostikdenisov@gmail.com

POPOVYCH PAVLO

PhD, Associate Professor,
Department of Acoustic and
Multimedia Electronic Systems,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-1572-3127>
Scopus Author ID: 55225965700
Researcher ID: J-6574-2017
E-mail: p.popovich80@gmail.com

DENISOV R. V., POPOVYCH P. V.

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

**PECULIARITIES OF APPLICATION OF OBJECT RECOGNITION SYSTEM
IN REAL TIME ON MICROCONTROLLERS WITH SUBSEQUENT VOISE OUTPUT
OF INFORMATION FOR PEOPLE WITH VISUAL IMPAIRMENTS**

Purpose. The study of the minimum and maximum time required to complete one full cycle of object name recognition-announcement taking into account different word lengths, different object recognition speeds, as well as physical characteristics of visually impaired people for real-time object recognition systems on microcontrollers with subsequent voice output.

Methodology. Creating variants of combinations of words of different lengths, taking into account the possibility of setting the speed of speech generation in Espeak, and the average speed of speech in Ukraine. Calculation of the minimum and maximum distance to the object at the start of the recognition-announcement cycle. The minimum and maximum time required for a full cycle of object name recognition-announcement is set.

Findings. On the basis of the Espeak language synthesizer and the peculiarities of the Ukrainian language and speech, the time required to announce the names of objects of different lengths was investigated. The minimum and maximum time for completing the full cycle of information recognition-announcement is set, taking into account the physical characteristics of people with visual impairments, their speed of movement and the speed of reaction to voice information. The minimum and maximum distance to the object at the start of the cycle was also obtained, depending on the time required to complete one complete cycle.

Originality. The minimum and maximum time needed to complete the full cycle of information recognition and announcement was obtained, taking into account the physical characteristics of visually impaired people, the technical capabilities of modern neural networks and programs for speech synthesis, as well as the minimum and maximum distance to the object at the time of the start of the cycle. The minimum and maximum distance to the object at the start of the recognition-announcement cycle was studied.

Practical value. The obtained results can be used in the practical creation of online object recognition systems, to assess the possibility of using certain neural networks, based on the obtained minimum and maximum time for passing the complete cycle of recognition-announcement of information, as well as the time required for passing each of its separate elements.

Keywords: image recognition systems; microcontrollers; voice output of information; convolutional neural networks; TensorFlow; English; MobileNet.

УДК 677.057

КОРОБЧЕНКО Є. О., ГОРОБЕЦЬ В. А., КРИКУН Є.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ НА ШВЕЙНИХ МАШИНАХ

Мета. Виконати аналіз впливу параметрів, структури та конструкції механізмів переміщення матеріалу та їх робочих органів на якість експлуатаційних показників швейної машини для виявлення напрямів їх покращення.

Методика. Застосований відомий метод аналітичного огляду інформаційних джерел, присвячених вирішенню вищевказаного питання.

Результати. В результаті дослідження літературних джерел було встановлено, що на експлуатаційні показники машини, а отже, і на якість її роботи в механізмі переміщення матеріалу, впливають наступні фактори: матеріал і маса притискного органу, фізико-механічні властивості його поверхні, параметри динамічної системи «притискний орган – матеріал – транспортуючий орган», (включаючи зусилля притискання матеріалу до голкової пластини при транспортуванні та розміри притискного органу). Важливе значення мають також конструкція транспортуючого органу, форма і стан його робочої поверхні, закон його руху та траєкторія, особливо при наявності декількох транспортуючих органів з урахуванням їх співставності. Попри різноманітні заходи, запропоновані для покращення експлуатаційних показників машин, повне усунення негативних явищ у процесі переміщення матеріалу не досягається. Кардинальне покращення якості процесу транспортування матеріалів на швейних машинах можливе лише шляхом розробки принципово нових креативних способів і засобів транспортування, які здатні забезпечити однакові умови переміщення верхнього та нижнього шарів матеріалу.

Наукова новизна. Наукова новизна цього дослідження полягає в розкритті суті впливу на якість швейних виробів параметрів (їх сукупностей) механізмів транспорту та їх робочих органів; в виявленні недоліків відомих процесів та механізмів транспортування матеріалів швейних машин, а також визначенні основних напрямків підвищення якості їх експлуатаційних показників.

Практична значимість. Результати проведеного аналізу можуть бути використані для цілеспрямованого розроблення нових більш перспективних способів, пристроїв та механізмів переміщення матеріалів швейних машин.

Ключові слова: експлуатаційні показники; механізм переміщення матеріалу; транспортуючий орган; посадка; стягування; зубчаста рейка; притискний орган.

Вступ. Питання підвищення якості переміщення матеріалу широко досліджене в літературі. Одна з перших статей присвячена даній тематиці опублікована у 1857 році [1]. В даний час актуальність його вирішення незмірно виросла в зв'язку застосуванням нових матеріалів та розробленням нового обладнання.

Основними експлуатаційними показниками швейної машини, які перевіряються при її прийманні на виробництві є:

1. Відносний зсув шарів матеріалів при їх зшиванні, так звана посадка матеріалу.
2. Зменшення загальної довжини зшитих матеріалів, тобто стягування.
3. Відповідність реальної довжини стібка паспортній.
4. Стабільність напрямку сточування матеріалів.
5. Коефіцієнт утяжки стібка (для човникових машин).

Як можна побачити, значення більшості показників напрямку залежить від якості транспортування матеріалів при зшиванні.

Основними транспортуючими органами в більшості швейних машин, які використовуються в швейних та трикотажних галузях, є зубчасті одно- або багаторядні рейки.

Вони працюють в парі з притискним органом – притискними лапками різних конструкцій, які притискаються до матеріалів пружними елементами.

При цьому для переміщення матеріалів в процесі зшивання в швейних та трикотажних галузях реалізують, в основному, наступні способи [2–5] схематично зображені на рис. 1:

Спосіб 1. Переміщення матеріалів на довжину стібка здійснюється однією зубчастою рейкою, а притиск матеріалів – підпружиненою притискною лапкою.

Спосіб 2. Переміщення матеріалів виконують рейками, які знаходяться по одну сторону матеріалів і мають різну величину ходів, а притиск – притискною лапкою, так званий диференційний спосіб переміщення матеріалів.

Спосіб 3. Транспортування матеріалів здійснюється за допомогою двох зубчастих рейок, розташованих по різні сторони матеріалів, що зшиваються. При цьому в процесі переміщення матеріали затискаються по чергово то між лапкою і нижньою рейкою, то між обома зубастими рейками, так званий принцип «крокуючої лапки». Водночас силове замикання верхньої рейки з матеріалами здійснюється аналогічно як з притискною лапкою, тобто пружним елементом.

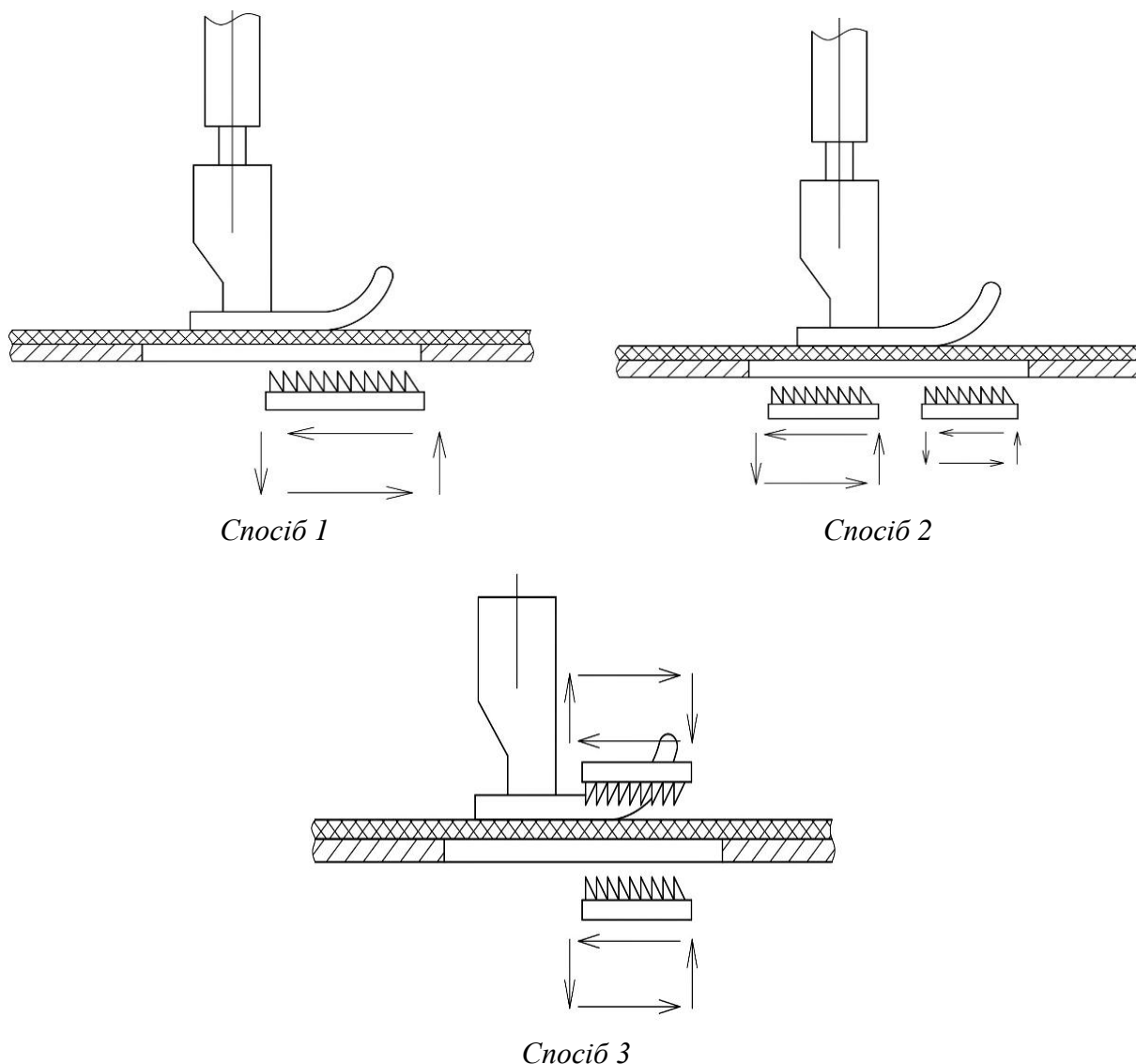


Рис. 1. Способи транспортування

Вказані способи реалізуються в швейному обладнанні всіх провідних фірм зокрема Jack A2B-C [6], Brother S-7180A-813 [7], Typical GC 6890HD4 [8] (перший спосіб), Jack W4-UT-01GB-356 [9] (другий спосіб), Juki DLU-5490N-7 [10], Baoyu GT-333-D4 [11], Precious P 0303D [12] (третій спосіб)

При цьому другий спосіб застосовується переважно в машинах ланцюгового стібка, номенклатура яких постійно розширюється.

Кожен спосіб має свої переваги і недоліки в залежності від конструкції і матеріалу робочих і притискних органів, швидкісного режиму машини, структури і конструкції механізмів транспорту, а також властивостей матеріалів, що зшиваються.

Крім вказаних способів застосовується також переміщення матеріалів за допомогою валкових [13] та роликів транспортуючих органів а також за допомогою голки, яка рухається синхронно з зубчастою рейкою. Однак аналіз номенклатури випуску машин провідними виробниками, до прикладу [14–20], свідчить про обмеженість їх застосування і, в основному, для матеріалів зі специфічними фізико-механічними властивостями. Також в роботі [21] показано, що використання пулерного механізму хоч і дещо впливає на показники стабільності величини стібка та стягування пакетів матеріалу, однак не має відчутного впливу на показники стабільності прямострочності та посадки нижнього шару матеріалу. Тому ці способи в даній роботі не розглядались.

Постановка завдання. Завданням даного дослідження є виявлення, аналіз та систематизація факторів, при кожному з вищеперерахованих способів транспортування, які впливають на значення експлуатаційних показників, планується критично проаналізувати методи та засоби підвищення якості процесу переміщення матеріалів, що пропонуються в інформаційних джерелах, та визначити шляхи створення нових, більш перспективних способів, пристроїв та механізмів транспортування матеріалів на швейних машинах.

Результати та їх обговорення. Розглянемо перший спосіб транспортування матеріалів. Він є найпоширенішим в зв'язку з порівно простою конструкцією робочих органів, пристроїв та механізмів для його реалізації.

Однак даному способу від самого початку притаманні недоліки, які повністю усунути неможливо [22].

- неадекватність умов транспортування верхнього та нижнього шарів матеріалу;
- залежність зусилля зчіплювання зубців рейки з матеріалом від фізико-механічних властивостей останнього;
- можливість пошкодження зубцями рейки легких матеріалів;
- можливість порушення контакту притискної лапки з матеріалом в процесі транспортування при значних швидкостях машини, а, значить, підвищенню динамічного впливу на неї зубчастої рейки;
- погіршення якості процесу транспортування в результаті зношення зубців рейки;
- різні траєкторії руху зубців рейки, що призводить до зміни умов взаємодії транспортуючих органів протягом кожного циклу їх роботи.

В основному наявність цих недоліків призводить до наступних порушень експлуатаційних показників [22]:

- взаємного зміщення шарів матеріалу (посадки);
- нестабільності довжини стібка;
- пошкодженню матеріалів;
- стягування шарів матеріалу;
- утворення складок на шві.

В той же час існує значне число літературних джерел, в яких описані способи та пристрої призначені для зменшення вищезазначених негативних явищ. Зокрема розглядається

вплив конструкції і матеріалів притискної лапки на величину посадки. Так в роботах [23, 24] показано, що зменшення посадки можна досягти застосуванням антифрикційних матеріалів для виготовлення притискних лапок (наприклад фторопластів) або нанесенням такого матеріалу на підошву лапок. Даний принцип реалізовано при виготовленні ряду прижимних лапок, до прикладу [25].

В роботі [26] показано, що покриття нижнього транспортуючого органу еластичним матеріалом дозволяє уникнути пошкодження матеріалу та нестабільності довжини стібка через зменшення явища «підскоку» прижимної лапки.

В роботі [27] стверджується, що зменшення посадки можна досягти мінімізацією зусилля притиску матеріалу лапкою або за рахунок визначеного кута нахилу передньої частини лапки, а також застосуванням додаткової нижньої притискної лапки, встановленої перед зубчастою рейкою.

Ще одним фактором впливу на величину посадки та стабільності стібка є маса притискної лапки. В роботах [28, 29] запропоновано застосовувати полегшені конструкції лапки, що призводить до суттєвого покращення значень цих показників.

Значна кількість робіт показує вплив сили притиску прижимної лапки на характеристики отриманого шва [2, 27, 30, 31–38]. Так для зменшення посадки рекомендується суттєво збільшити зусилля притиску лапки [2], на противагу рекомендаціям роботи [27]. В роботі [31] показано зменшення висоти утворених складок тканини при збільшенні сили притиску лапки. В той же час в інших джерелах [32] стверджується, що це може призвести до слідів від лапки на тканині («ласс»), або навіть до прорубування тканини зубчастою рейкою. Крім того це призводить до виникнення перед лапкою внаслідок суттєвої деформації верхнього шару матеріалів, так званого, «горбка», що навпаки призводить до збільшення посадки. Однак в [33] зазначено про незначний вплив сили притиску лапки на зовнішній вигляд отриманого шва та його міцність. В роботах [34, 35] досліджено вплив зовнішніх сил тертя на довжину стібка. вказано, що при незначних зовнішніх силах тертя (спричинених притиском лапки) довжина стібка має тенденцію до нестабільності. В роботі [30] рекомендовано створювати зусилля притиску прижимної лапки близько 40 Н. В роботі [30] зазначено значний вплив на якість шва таких параметрів як швидкість шиття, сили притиску притискної лапки, типу механізму транспортування, конструкції притискної лапки. В роботі [37] запропоновано використовувати пружній демпфер в конструкції притискної лапки для покращення властивостей шва.

Таким чином можна констатувати, що на даний час немає єдиної думки щодо впливу зусилля притиску лапок на якість транспортування матеріалів.

Багато досліджень присвячено впливу на якість транспортування конструкції і параметрів робочої поверхні безпосередньо зубчастих рейок.

Так в роботах [32, 39, 40] вказано на негативний вплив на експлуатаційні показники явища заповнення матеріалами мікрооб'ємів в просторі між зубцями рейок при їх транспортуванні, величина якого залежить від розмірів зубців рейок, та відстані між ними. Зокрема в роботі [39] вказується на необхідність підбору індивідуальних параметрів зубчастої рейки, в залежності від типу тканин, для зменшення явища проковзування матеріалів.

В роботі [33] досліджено вплив використання зубчастих реек з гумовим покриттям на якість шва.

Пропонується також [41, 43] розміщення між зубцями зубчастих рейок додаткових робочих поверхонь, що мають достатню шорсткість для зчіплювання з матеріалами. Це дозволяє також збільшити зусилля транспортування при меншому зусиллі притиску лапки, що позитивно впливає на значення експлуатаційних показників.

Більш того в роботах [22, 40, 44, 45] пропонується наносити таку шорстку поверхню на всю робочу частину зубчастої рейки (зокрема методом металізації напиленням), або навіть зовсім відмовитися від зубців, а виконати робочу поверхню транспортуючого органу рівною, або яка має криволінійну форму, адаптовану до закону його руху, і які мають достатню шорсткість для зчіплювання з матеріалом при його переміщенні [46, 47]. Такі конструкції дозволяють зменшити негативні явища при транспортуванні матеріалів, але не усувають їх повністю.

Частина робіт присвячена впливу швидкості обертання головного валу швейної машини на якість отриманого шва. Так [31] показано зменшення хвилястості шва при зменшенні швидкості.

Значна кількість опублікованих робіт присвячена дослідженню впливу на експлуатаційні показники параметрів динаміки процесу транспортування, тобто дослідженню динамічної моделі «рейка – матеріал – притискна лапка» і розробленню на основі цього критеріїв синтезу відповідних механізмів і пристроїв.

Було встановлено [22, 38, 40, 48–54], що закон руху зубчастої рейки, форма її траєкторії, швидкість машини, маса притискного пристрою, величина виходу зубців рейки з під голкової пластини, та величина попереднього притиску лапки суттєво впливають на динамічні показники системи і відповідно на експлуатаційні показники машини, в першу чергу на стабільність довжини стібків та посадки. В дослідженні [36] розглянуто питання залежності сил, що виникають в системі «зубчаста рейка – шари тканин – притискна лапка» від швидкості обертання головного валу машини та властивості тканин що транспортуються.

Дані дослідження показали, що в більшості випадків при роботі сучасних швейних машин, які експлуатуються при робочій швидкості 3...4 тис. об/хв, виникає таке вкрай негативне явище як «підскок» лапки, тобто порушення нормальних умов взаємодії між рейкою та лапкою при переміщенні матеріалів, що призводить до різкого погіршення якості переміщення матеріалів. Так в роботі [55] показана залежність вертикальних переміщень притискної лапки від швидкості обертання головного валу машини. При цьому в роботі [56] показана залежність переміщення лапки не тільки від швидкості, а й від типу та товщини тканин, що зшиваються.

Так в роботі [38] було встановлено, що за низьких навантажень на притискну лапку спостерігався її «підскок» при збільшенні швидкості обертання верхнього вала. Однак, і за високих навантажень на притискну лапку також спостерігався «підскок», що виникав внаслідок коливань транспортуючої зубчастої рейки.

Для мінімізації негативних наслідків цього явища необхідно щоб:

- 1) величина виходу зубців рейки над поверхнею голкової пластини та горизонтальна складова її переміщення в даний період була мінімальні;
- 2) траєкторія рейки при робочому її ході була близька до прямої;
- 3) складова циклу транспортування в загальному циклі роботи машини була мінімальною;
- 4) маса притискного пристрою лапки повинна бути мінімальною, а жорсткість транспортуючої зубчастої рейки максимальною.

Для досягнення першої умови в літературних джерелах [22, 44, 47, 57] пропонуються конструкції транспортуючих органів, які забезпечують підвищене зчіплювання з матеріалом уже при мінімальній величині виходу їх поверхонь з-під голкової пластини в зв'язку з додатковою взаємодією їх з матеріалами на мікрорівні.

Для виконання другої умови в роботах [23, 58–60] розглянуті різні способи оптимізації параметрів відомих механізмів транспорту, зокрема взаємним зсувам фаз роботи кінематичних ланцюгів підйому та горизонтального переміщення рейки.

Забезпечення виконання третьої умови, яке паралельно сприяє і виконанню другої, досягається розробленням механізмів, які надають зубчастій рейці рух по необхідній траєкторії. Для цього застосовуються додаткові кінематичні ланцюги, що забезпечують відсутність вертикальних переміщень на фазі транспортування або за рахунок 6-ланкових кінематичних ланцюгів або чотирьох-ланкових з використанням так званого шарнірного паралелограма [61], а в сучасних автоматизованих машинах за рахунок крокових двигунів в кінематичних ланцюгах механізму рейки [62]. В роботах [63, 64] розглянуті питання синтезу та аналізу таких механізмів. В роботах [60, 65] пропонуються механізми транспортування, що забезпечують збільшення радіуса кривизни траєкторії зубчастої рейки, для кращого зчеплення її з матеріалом

Однак слід зауважити, що введення в механізм транспорту додаткових кінематичних ланцюгів призводить до погіршення динамічних характеристик машини, ускладнює та здорожчує її обслуговування та налагодження.

Про методи досягнення четвертої умови було вказано вище (в першу чергу, за рахунок матеріалів з яких виготовлений притискний пристрій).

Ряд робіт присвячено питанню проектування механізмів просування матеріалу з оптимальними параметрами [22, 60, 66, 67].

Резюмуючи аналітичний огляд першого способу транспортування, можемо відзначити значну різноманітність методів та пристроїв для покращення якості його реалізації.

Однак ні один з запропонованих заходів не забезпечує повного усунення негативних явищ.

Що стосується другого способу переміщення матеріалів основною та додатковою зубчастими рейками, то все, що висвітлювалось вище при розгляді першого способу транспортування, повністю відноситься і до нього.

Наявність додаткової зубчастої рейки з окремим механізмом дозволяє суттєво зменшити [51, 68, 69] деформацію нижнього шару матеріалу, однак, внаслідок відсутності можливості впливати на умови транспортування верхнього шару матеріалу вказаний спосіб також не може забезпечити повне досягнення якісних значень експлуатаційних показників.

В літературних джерелах не виявлено досліджень щодо особливостей впливу на якість транспортування матеріалів параметрів притискних пристроїв чи транспортуючих органів безпосередньо диференціальних механізмів переміщення матеріалу.

Тому дослідження стосуються лише удосконаленню параметрів і структури самих механізмів.

Так в роботі [22] пропонується дві нових структури диференціальних механізмів транспорту, кожна з яких має по дві модифікації. Одна з модифікацій передбачає введення пружного елемента в кінематичний ланцюг вертикальних переміщень допоміжної зубчастої рейки і закріплення притискної лапки в визначеному положенні. Це дозволить уникнути «підскоку» лапки і забезпечити допоміжній рейці рух по прямолінійній траєкторії в період транспортування.

Також в роботах [22, 68–70] розглянуто оптимізаційний синтез та розроблення структури і конструкції диференціальних механізмів транспорту з урахуванням властивостей матеріалів, що зшиваються, так званих адаптивних механізмів, з метою підвищення якості транспортування матеріалів.

Наостанок слід відмітити, що диференціальні механізми транспорту застосовуються не лише тільки для зменшення посадки матеріалу, а й, в разі необхідності, для її отримання з визначеними параметрами.

Що стосується усунення явища посадки як негативного, то (виходячи з результатів досліджень у наведених вище роботах), воно досягається лише частково, як і при

однорейковому способі транспортування, незважаючи на отримані при синтезі оптимальні параметри диференціальних механізмів.

Головними причинами неможливості повного усунення явищ посадки та нестабільності довжини стібка за допомогою однорейкового та диференціального способу переміщення матеріалу є неможливість створення однакових умов транспортування його верхнього та нижнього шарів, та виникання при високих швидкостях машини явища «підскоку» лапки.

Для розширення можливостей покращення експлуатаційних показників машини застосовують третій спосіб з верхнім і нижнім транспортуючими органами.

Власне згідно з [22] такі способів є кілька:

- адаптованих до нижнього транспортуючого органу
- адаптованих до верхнього транспортуючого органу
- в якому реалізований принцип адаптації до матеріалу, що обробляється

Під адаптацією автор розуміє – вертикальна складова руху одного транспортуючого органу є ведучою, а інший адаптується до нього пружним зв'язком в відповідному механізмі.

В останньому випадку наявність пружного зв'язку передбачається в кінематичному ланцюзі горизонтальних переміщень.

Як і при диференціальному способі переміщення матеріалів верхнім і нижнім транспортуючими органами може застосовуватись не тільки для зменшення явища посадки а, й для отримання заданого її значення. В цьому випадку між шари матеріалу вводиться додатковий розділяючий елемент.

Що стосується результатів усунення негативних явищ при переміщенні матеріалів за допомогою верхнього та нижнього транспортуючих органів, що полягає в створенні однакових умов транспортування для верхнього та нижнього шарів матеріалу [70], то як показали дослідження [48, 68, 71, 72], повного досягнення цієї умови досягти неможливо, оскільки відповідні механізми мають різну структуру. Також не вдається усунути явище «підскоку» лапки [73]. Тому всі подібні дослідження [74–78] були направлені на розробку нових структур механізмів верхнього транспортуючого органу та оптимізацією їх функціональних та динамічних параметрів, як з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу, що транспортується, так і без.

Результуючи розгляд третього способу транспортування слід відмітити, що, незважаючи на суттєве підвищення ремонтоскладності швейних машин внаслідок застосування 12-16 ланкових механізмів верхнього та нижнього транспорту та значне їх здорожчання порівняно з машинами з однорейковим механізмом транспорту, застосування їх для підвищення якості переміщення деяких видів матеріалів на даний час є безальтернативним. Більше того, пристосування для верхнього транспорту пропонуються навіть для побутових швейних машин [79, 80].

Висновки:

1. В результаті проведеного аналітичного огляду літературних джерел встановлено, що основними факторами впливу на значення експлуатаційних показників машини, а, значить, на якість її роботи в механізмі переміщення матеріалу є: матеріал і маса притискного органу, фізико-механічні властивості його поверхні, параметри динамічної системи «притискний орган-матеріал-транспортуючий орган» (зокрема зусилля притискання матеріалу до голкової пластини при транспортуванні та розміри притискного органу). Не менш важливе значення мають конструкції транспортуючого органу, форма і стан його робочої поверхні, а також закон його руху та траєкторія. Це ж відноситься і до випадку, коли транспортуючих органів кілька з урахуванням їх співставності.

2. Незважаючи на різноманітність заходів, запропонованих для покращення значень експлуатаційних показників машини, їх впровадження не забезпечує повне усунення негативних явищ в процесі переміщення матеріалу.

3. Досягнення кардинального покращення якості процесу транспортування матеріалів на швейних машинах може бути здійснене тільки розробленням принципово нових креативних способів та засобів транспортування. Зокрема таких, які можуть забезпечити однакові умови переміщення верхнього та нижнього шарів матеріалу.

References

1. Andrus (1857). Feed for Sewing Machines. *Scientific American*, 13(12), 92–92. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican11281857-92c>.
2. Orlovskyj, B. V., Abrinova, N. S. (2013). Tekhnologichne obladnannia haluzi (shvejne vyrobnytstvo) [Technological equipment of the industry (sewing production)]. Kyiv: KNUVD. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/4513> [in Ukrainian].
3. Jana, P. (2015). Sewing equipment and work aids. In: *Garment Manufacturing Technology*. Nayak, R., Padhye, R. (ed). Cambridge: Woodhead Publishing. Chapter 11: P. 275–315. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-232-7.00011-4>.
4. Sharofovna, T. G. (2021). Material Handling Mechanisms In The Sewing Machine. *The American Journal of Applied sciences*, 3 (04), P. 285–291. <https://doi.org/10.37547/tajas/volume03issue04-40>.
5. Katspustenskyj, P. H., Manziuk, Ye. A. (2012). Transportuiuchi systemy shvejnykh mashyn ta ikh robota [Transport systems of sewing machines and their operation]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky = Bulletin of Khmelnytskyi National University. Series: Technical Sciences*, 5, P. 25–29 [in Ukrainian].
6. Promyslova shvejna mashyna Jack A2B-C z vbudovanyim enerhozberihaiuchym servopryvodom i avtomatychnoiu obrizkoiu nytky, dlia lehkykh ta serednikh tkanyn [Industrial Sewing Machine Jack A2B-C with Built-in Energy-Saving Servo Drive and Automatic Thread Trimming, for Light and Medium Fabrics]. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/jack-a2b-c-pryamostrochka-z-obrizannyam-nitki-dlya-legkix-i-serednix-tkanin/> [in Ukrainian].
7. Brother S-7180A-813 Promyslova shvejna mashyna dlia lehkykh ta serednikh materialiv [Brother S-7180A-813 Industrial Sewing Machine for Light and Medium Materials]. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/brother-s-7180a-813/> [in Ukrainian].
8. Typical GC 6890HD4 1-holkova promyslova shvejna mashyna [Typical GC 6890HD4 Single-Needle Industrial Sewing Machine]. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/typical>

Література

1. Andrus. Feed for Sewing Machines. *Scientific American*. 1857. № 13 (12). P. 92–92. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican11281857-92c>.
2. Орловський Б. В, Абрінова Н. С. Технологічне обладнання галузі (швейне виробництво): навчальний посібник. Київ: КНУТД, 2013. 285 с. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/4513>.
3. Jana P. Sewing equipment and work aids. In: *Garment Manufacturing Technology*. Nayak, R., Padhye, R. (ed). Cambridge: Woodhead Publishing. 2015. Chapter 11: P. 275–315. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-232-7.00011-4>.
4. Sharofovna T. G. Material Handling Mechanisms In The Sewing Machine. *The American Journal of Applied sciences*. 2021. № 3 (04). P. 285–291. <https://doi.org/10.37547/tajas/volume03issue04-40>.
5. Кацпустенський П. Г., Манзюк Є. А. Транспортуючі системи швейних машин та їх робота. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2012. № 5. С. 25–29.
6. Промислова швейна машина Jack A2B-C з вбудованим енергозберігаючим сервоприводом і автоматичною обрізкою нитки, для легких та середніх тканин. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/jack-a2b-c-pryamostrochka-z-obrizannyam-nitki-dlya-legkix-i-serednix-tkanin/>
7. Brother S-7180A-813 Промислова швейна машина для легких та середніх матеріалів. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/brother-s-7180a-813/>
8. Typical GC 6890HD4 1-гольова промислова швейна машина. URL: <https://sewtech.com>

- [-gc-6890hd4-1-golkova-promislova-shvejna-mashina/](#) [in Ukrainian].
9. Jack W4-UT-01GB-356 3-kh holkova ploskoshovna mashyna z avtomatychnym obrizanniam nytky [Jack W4-UT-01GB-356 3-Needle Flatbed Machine with Automatic Thread Trimming]. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/jack-w4-ut-01gb-356-364-3-x-golkova-ploskoshovna-mashina-z-avtomatichnim-obrizannyam-nitki/> [in Ukrainian].
10. Juki DLU-5490N-7. Engineer's Manual. URL: https://www.juki.co.jp/industrial_j/download_j/manual_j/dlu5490n/pdf/instruction_5k_ce.pdf.
11. Baoyu GT-333-D4 Komp'uteryzovana promyslova shvejna mashyna z podvijnym transportom dlia vazhkykh materialiv [Baoyu GT-333-D4 Computerized Industrial Sewing Machine with Dual Feed for Heavy Materials]. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/baoyu-gt-333-d4-promislova-shvejna-mashina-z-podvijnim-prosuvannyam-dlya-vazhkix-materialiv/> [in Ukrainian].
12. Precious P 0303D 1-holkova promyslova shvejna mashyna z podvijnym prosuvanniam materialu [Precious P 0303D Single-Needle Industrial Sewing Machine with Dual Material Feed]. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/precious-p-0303d-1-golkova-promislova-shvejna-mashina-z-podvijnim-prosuvannyam-materialu/> [in Ukrainian].
13. Shcherban, Yu. Yu., Mostipan, O. M. (2002). Zastosuvannia pulernykh mekhanizmv [Application of Puller Mechanisms]. *Lehka promislovist = Light Industry*, No. 3, P. 63 [in Ukrainian].
14. JUKI Apparel Industrial Sewing Machines. URL: <https://juki.com/appare>.
15. Typical. URL: https://www.typicalinternational.com/ec/do/xagj/xagj~2010_1000~1~1.html?cid=HS_20&usetype=&key=.
16. Brother Industrial Sewing Machine Products for Apparel Lineup. URL: <https://industrialsewingmachine.global.brother/en-emea/index.aspx?ga=2.31126073.769102402.1713778284-272744631.1713778284>.
17. Minerva. URL: <http://minerva.com.ua/sewing-mashines>.
18. SINGER Sewing Machines. URL: <https://www.singer.com/collections/singer-sewing-machines>.
19. PFAFF Sewing Machines. URL: <https://www.singer.com/collections/pfaff-sewing-machines>.
20. Dürkopp Adler. URL: <https://www.duerkopp-adler.com/products/industrial-sewing-machines/industrial-applications/overview/#>.
21. Shcherban, Yu. Yu., Mostipan, O. M. (2003). Porivniannia iakosti roboty shvejnykh mashyn zahalnoho pryznachennia i osnaschenoi pulernym mekhanizmom
- [ua/uk/typical-gc-6890hd4-1-golkova-promislova-shvejna-mashina/](#)
9. Jack W4-UT-01GB-356 3-x golkoва ploskoshovna mashyna z avtomatichnim obrizanniam nitky. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/jack-w4-ut-01gb-356-364-3-x-golkova-ploskoshovna-mashina-z-avtomatichnim-obrizannyam-nitki/>
10. Juki DLU-5490N-7. Engineer's Manual. URL: https://www.juki.co.jp/industrial_j/download_j/manual_j/dlu5490n/pdf/instruction_5k_ce.pdf.
11. Ваоу GT-333-D4 Комп'ютеризована промислова швейна машина з подвійним транспортом для важких матеріалів. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/baoyu-gt-333-d4-promislova-shvejna-mashina-z-podvijnim-prosuvannyam-dlya-vazhkix-materialiv/>
12. Precious P 0303D 1-голкова промислова швейна машина з подвійним просуванням матеріалу. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/precious-p-0303d-1-golkova-promislova-shvejna-mashina-z-podvijnim-prosuvannyam-materialu/>
13. Щербань Ю. Ю., Мостіпан О. М. Застосування пулерних механізмів. *Легка промисловість*. 2002. № 3. С. 63.
14. JUKI Apparel Industrial Sewing Machines. URL: <https://juki.com/appare>.
15. Typical. URL: https://www.typicalinternational.com/ec/do/xagj/xagj~2010_1000~1~1.html?cid=HS_20&usetype=&key=.
16. Brother Industrial Sewing Machine Products for Apparel Lineup. URL: <https://industrialsewingmachine.global.brother/en-emea/index.aspx?ga=2.31126073.769102402.1713778284-272744631.1713778284>.
17. Minerva. URL: <http://minerva.com.ua/sewing-mashines>.
18. SINGER Sewing Machines. URL: <https://www.singer.com/collections/singer-sewing-machines>.
19. PFAFF Sewing Machines. URL: <https://www.singer.com/collections/pfaff-sewing-machines>.
20. Dürkopp Adler. URL: <https://www.duerkopp-adler.com/products/industrial-sewing-machines/industrial-applications/overview/#>
21. Щербань Ю. Ю., Мостіпан О. М. Порівняння якості роботи швейних машин загального призначення і оснащеної

- [Comparison of the quality of work between general-purpose sewing machines and those equipped with a puller mechanism]. *Visnyk KNUTD*, No. 2, P. 112–118 [in Ukrainian].
22. Shcherban, Yu. Yu. (2000). *Naukovi zasady proektuvannia shvejnykh mashyn z rehulovanoiu pasadkoiu materialu* [Scientific principles of designing sewing machines with regulated material feed: Doctor's thesis]. Kyiv. 411 p. [in Ukrainian].
23. Culpin, M. F. (1979). The shearing of fabrics: a novel approach. *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 70, Iss. 3.
24. Jucienė, M., Vobolis, J. (2004). Influence of fabric external friction force and certain parameters of a sewing machine upon stitch length. *Materials Science*, 10 (1), P. 101–104.
25. Texi 1004 Lapka teflonova [Texi 1004 teflon foot]. <https://janome.in.ua/uk/lapki-i-prinadlezhnosti-originalnye/texi-1004-lapka-teflonovaya.html> [in Ukrainian].
26. Robak, D. A. (2002). Model of fabric transport in a sewing machine using a feed dog covered with a supple material of increased friction. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 3 (38).
27. Poliński, Z. (1982). Kształtowanie stopki dociskowej maszyny szyjącej w założeniu minimalizacji oporów przesuwania jej po tkaninie. *Odzież*, No. 5–6.
28. Russell Angus R. T., inventors (1986). Adjustable low inertia presser bar. United States of America patent, no. 4630557. URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US37596005& cid=P20-LVB32U-48230-2>.
29. Dunn Earl F., Erskine Henry, Hooper Edward, inventors (1977). Sewing machine presser bar mechanism. United States of America patent, no. 4058071. URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US36945275& cid=P10-LVB3FB-86082-1>.
30. Germanova-Krasteva, D., Petrov, H. (2008). Investigation on the Seam's Quality by Sewing of Light Fabrics. *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 20, Iss. 1, P. 57–64. <https://doi.org/10.1108/09556220810843539>.
31. Dobilaitė, V., Juciene, M. (2007). Influence of Sewing Machine Parameters on Seam Pucker. *Tekstil: časopis za tekstilnu i odjevnu tehnologiju*, Vol. 56, Iss. 5, P. 293–300.
32. Horobets, V. A., Shcherban, Yu. Yu. (1990). *Doslidzhennia deformatsii materialu v oblasti podachi pid prytysknoiu lapkoiu* [Investigation of material deformation puller mechanism]. *Вісник КНУТД*. 2003. № 2. С. 112–118.
22. Щербань Ю. Ю. Наукові засади проектування швейних машин з регульованою пасадкою матеріалу: дис. д-ра. техн. наук: 05.05.10. Київ, 2000. 411 с.
23. Culpin M. F. The shearing of fabrics: a novel approach. *The Journal of The Textile Institute*. 1979. Vol. 70, № 3.
24. Jucienė M., Vobolis J. Influence of fabric external friction force and certain parameters of a sewing machine upon stitch length. *Materials Science*. 2004. № 10 (1). P. 101–104.
25. Texi 1004 Лапка тefлонова <https://janome.in.ua/uk/lapki-i-prinadlezhnosti-originalnye/texi-1004-lapka-teflonovaya.html>.
26. Robak D. A. Model of fabric transport in a sewing machine using a feed dog covered with a supple material of increased friction. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2002. № 3 (38).
27. Poliński Z. Kształtowanie stopki dociskowej maszyny szyjącej w założeniu minimalizacji oporów przesuwania jej po tkaninie. *Odzież*. 1982. № 5–6.
28. Russell Angus R. T., inventors. Adjustable low inertia presser bar. United States of America patent, № 4630557, 1986. URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US37596005& cid=P20-LVB32U-48230-2>.
29. Dunn Earl F., Erskine Henry, Hooper Edward, inventors. Sewing machine presser bar mechanism. United States of America patent, № 4058071, 1977. URL: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US36945275& cid=P10-LVB3FB-86082-1>.
30. Germanova-Krasteva D., Petrov H. Investigation on the Seam's Quality by Sewing of Light Fabrics. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2008. Vol. 20, № 1. P. 57–64. <https://doi.org/10.1108/09556220810843539>.
31. Dobilaitė V., Juciene M. Influence of Sewing Machine Parameters on Seam Pucker. *Tekstil: časopis za tekstilnu i odjevnu tehnologiju*. 2007. Vol. 56, № 5. P. 293–300.
32. Горобець В. А., Щербань Ю. Ю. Дослідження деформації матеріалу в області подачі під притискною лапкою. Київ:

- in the feed area under the presser foot]. Kyiv: Deposited at UkNIINTI 14.12.90, no. 942-Uk90 [in Ukrainian].
33. Al-Gamal, G. (2015). A study on the effect of modified feed-dogs on satin fabrics. *International Design Journal*, Vol. 5, Iss. 3, P. 1075–1083.
34. Jucienė, M., Vobolis, J. (2007). Correlation between the seam stitch length of the sewing garment and friction forces. *Material Science (Medžiagotyra)*, Vol. 13, Iss. 1, P. 74–78.
35. Jucienė, M., Vobolis, J. (2009). Dependence of stitch length along the seam on external friction force theoretical analysis. *Materials Science*, Vol. 15, Iss. 3, P. 273–276.
36. Šajatović, B. B., Bolić, B., Petrak, S. (2018). Impact of vertical and horizontal forces on the seam in the technological process of sewing knit fabrics. *Autex Research Journal*, Vol. 18, Iss. 4, P. 330–336. <https://doi.org/10.1515/aut-2018-0003>.
37. Djuraev, A., Mansurova, M., Bozorova, F. (2024). Physical and mechanical calculation of the efficiency of a composite kick shock absorber and the friction force with the material. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2697. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2697/1/012014>.
38. Horino, T., Okubo, H., Tanaka, Y. (1988). Fabric feeding behavior of sewing machine with the drop feed. *Sen'i Kikai Gakkaishi (Journal of the Textile Machinery Society of Japan)*, Vol. 41, Iss. 3, P. 214–223. https://doi.org/10.4188/transjtmsj.41.3_p214.
39. Rahman, M. F., Alam, M. A., Hossain, K. R. et al. (2023). Impact of modified feed mechanism on seam quality of garments. *Annals of the University of Oradea of Textiles, Leatherwork*, Vol. 24, P. 89–96.
40. Selivonchik, I. S. (1994). Rozrobka transportuiuchykh orhaniv shvejnykh mashyn [Development of Sewing Machine Feed Mechanisms: Candidate's thesis]. Kyiv. 173 p. [in Ukrainian].
41. Horobets, V. A., Kadenatsyj, L. A., Shcherban, Yu. Yu., inventors (1992). Prystriy dlia transportuvannia tkanyny na shvejnij mashyni [Fabric transport mechanism on a sewing machine]. Ukrainian patent, No 01730281 [in Ukrainian].
42. Mayer, J., inventors (1961). Stofftransporteur und Stichplatte an einer Nähmaschine. Swiss Patent, № CH354657.
43. Mayer, J., inventors (1962). Stofftransporteur und Stichplatte an einer Nähmaschine. Swiss Patent, № CH362304.
- УкрНІІНТІ, 1990, 10 с. Депонування в УкрНІІНТІ 14.12.90 №942-Ук90.
33. Al-Gamal G. A study on the effect of modified feed-dogs on satin fabrics. *International Design Journal*. 2015. Vol. 5, № 3. P. 1075–1083.
34. Jucienė M., Vobolis J. Correlation between the seam stitch length of the sewing garment and friction forces. *Material Science (Medžiagotyra)*. 2007. Vol. 13, № 1. P. 74–78.
35. Jucienė M., Vobolis J. Dependence of stitch length along the seam on external friction force theoretical analysis. *Materials Science*. 2009. Vol. 15, № 3. P. 273–276.
36. Šajatović B. B., Bolić B., Petrak S. Impact of vertical and horizontal forces on the seam in the technological process of sewing knit fabrics. *Autex Research Journal*. 2018. Vol. 18, № 4. P. 330–336. <https://doi.org/10.1515/aut-2018-0003>.
37. Djuraev A., Mansurova M., Bozorova F. Physical and mechanical calculation of the efficiency of a composite kick shock absorber and the friction force with the material. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2697. <https://doi.org/10.1088/1742-596/2697/1/012014>.
38. Horino T., Okubo H., Tanaka Y. Fabric feeding behavior of sewing machine with the drop feed. *Sen'i Kikai Gakkaishi (Journal of the Textile Machinery Society of Japan)*. 1988. Vol. 41, № 3. P. 214–223. https://doi.org/10.4188/transjtmsj.41.3_p214.
39. Rahman M. F., Alam M. A., Hossain K. R. et al. Impact of modified feed mechanism on seam quality of garments. *Annals of the University of Oradea of Textiles, Leatherwork*. 2023. Vol. 24. P. 89–96.
40. Селівончик І. С. Розробка транспортуючих органів швейних машин: дис. канд. техн. наук: 05.02.13. Київ, 1994. 173 с.
41. Горобець В. А., Каденацій Л. А., Щербань Ю. Ю., винахідники. Пристрій для транспортування тканини на швейній машині. Україна патент, No 01730281, 1992.
42. Mayer, J., inventors. Stofftransporteur und Stichplatte an einer Nähmaschine. Swiss Patent, № CH354657, 1961.
43. Mayer, J., inventors. Stofftransporteur und Stichplatte an einer Nähmaschine. Swiss Patent, № CH362304, 1962.

44. Shcherban, Yu. Yu., Horobets, V. A., Selivonchik, I. S. (1991). Transportni orhany shvejnykh mashyn scho zabezpechuiut pidvyschenu zcheplenist materialiv [Transport organs of sewing machines providing increased material grip]. *Vidomosti vuziv. Tekhnolohiia lehkoi promyslovosti = University News. Light industry technology*, No. 4, P. 32–34 [in Ukrainian].
45. Shcherban, Yu. Yu. (1991). Sposib vidnovlennya znoshenykh poverkhon' transportnykh robochykh orhaniv shvejnykh mashyn [Method of restoring worn surfaces of transport working parts of sewing machines]. *Shveyna promyslovist*, No. 4, P. 29 [in Ukrainian].
46. Horobets, V. A., Manoylenko, O. P. (2009). Proektuvannya profilu robochoyi poverkhni transportuyuchykh orhaniv shveynykh mashyn [Designing the profile of the working surface of transporting organs of sewing machines]. *Visnyk KNUVD*, No. 2, P. 7–9. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/6938> [in Ukrainian].
47. Horobets, V. A., inventors (2009). Transportovalnyj orhan shvejnoi mashyny [Transporting mechanism of a sewing machine]. *Ukrainy patent*, № 40981 [in Ukrainian].
48. Horobets, V. A., Shcherban, Yu. Yu., Nosov, M. S. (1986). Doslidzhennya roboty pruzhnogo elementa mekhanizmu transportuvannya shveyanoi mashyny [Investigation of the operation of the elastic element of the transport mechanism of a sewing machine]. *Vidomosti vuziv. Tekhnolohiya lehkoi promyslovosti = University News. Light Industry Technology*, No. 6, P. 95–98 [in Ukrainian].
49. Shcherban, Yu. Yu., Horobets, V. A. (1989). Rozrobka adaptivnoho mekhanizmu peremishchennya materialiv [Development of an adaptive mechanism for material movement]. Kyiv: Deposited at UknIINTI 3.12.89 no. 225-Uk89 [in Ukrainian].
50. Shcherban, Yu. Yu., Horobets, V. A. (1989). Vdoskonalennya konstruktsiyi mekhanizmu peremishchennya materialu [Improvement of the design of the material movement mechanism]. *Legka promyslovist = Light Industry*, No. 4, P. 29–31 [in Ukrainian].
51. Shcherban, Yu. Yu., Horobets, V. A. (1990). Uzahalnena matematychna model kombinovanoho riykovoho rushiya [Generalized mathematical model of a combined swarm drive]. Kyiv: Deposited at UknIINTI 16.10.90 №544-Uk90 [in Ukrainian].
52. Shcherban, Yu. Yu. (1990). Parametrychnyy syntez mekhanizmu peremishchennya materialu [Parametric synthesis of the material movement mechanism]. Kyiv: Deposited at UknIINTI 16.10.90 №543-Uk90 [in Ukrainian].
53. Shcherban, Yu. Yu. (1990). Doslidzhennya dempfuyuchykh vlastyvostey materialiv [Investigation of damping properties of materials]. Kyiv: Deposited at UknIINTI 14.12.90 №941-Uk90 [in Ukrainian].
44. Щербань Ю. Ю., Горобець В. А., Селівончик І. С. Транспортні органи швейних машин що забезпечують підвищену зчепленість матеріалів. *Відомості вузів. Технологія легкої промисловості*. 1991. № 4. С. 32–34.
45. Щербань Ю. Ю. Спосіб відновлення зношених поверхонь транспортних робочих органів швейних машин. *Швейна промисловість*. 1991. № 4. С. 29.
46. Горобець В. А., Манойленко О. П. Проектування профілю робочої поверхні транспортуючих органів швейних машин. *Вісник КНУТД*. 2009. № 2. С. 7–9. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/6938>.
47. Горобець В. А., винахідник. Транспортувальний орган швейної машини. *України патент*, № 40981, 2009.
48. Горобець В. А., Щербань Ю. Ю., Носов М. С. Дослідження роботи пружного елемента механізму транспортування швейної машини. *Відомості вузів. Технологія легкої промисловості*. 1986. № 6. С. 95–98.
49. Щербань Ю. Ю., Горобець В. А. Розробка адаптивного механізму переміщення матеріалів. Київ: 1989. 9 с. Деп. в УкрНІІНТІ 3.12.89 №225-Ук89.
50. Щербань Ю. Ю., Горобець В. А. Вдосконалення конструкції механізму переміщення матеріалу. *Легка промисловість*. 1989. № 4. С. 29–31.
51. Щербань Ю. Ю., Горобець В. А. Узагальнена математична модель комбінованого рійкового рушія. Київ: 1990. 12 с. Деп. в УкрНІІНТІ 16.10.90 №544-Ук90.
52. Щербань Ю. Ю. Параметричний синтез механізму переміщення матеріалу. Київ: 1990. 10 с. Деп. в УкрНІІНТІ 16.10.90 №543-Ук90.
53. Щербань Ю. Ю. Дослідження демпфуючих властивостей матеріалів. Київ: 1990. 7 с. Деп. в УкрНІІНТІ 14.12.90 №941-Ук90.

54. Shcherban, Yu. Yu., Horobets, V. A. (1990). Rozrobka ratsional'nykh umov vzaemodiyi robochych organiv shveynykh mashyn [Development of rational conditions for the interaction of working parts of sewing machines]. Kyiv: Deposited at UkNIINTI 14.12.90 №943-Uk90 [in Ukrainian].
55. Jankoska, M., Demboski, G. (2017). The influence of the sewing speed and fabric thickness on sewing machine stitch formation parameters. *Advanced Technologies*, Vol. 6, Iss. 2, P. 72–77. <https://doi.org/10.5937/savteh1702072j>.
56. Carvalho, M. A., Demboski, G., Nofitoska, M. (2013). Study of the presser foot displacement in a lockstitch sewing machine. *Textile Science and Economy: 5th International Scientific-Professional Conference* (pp. 144–148). Zrenjanin, Serbia.
57. Scherban, Yu. Yu. (1992). Teoretychne doslidzhennia efektu dynamichnoi vzaiemodii pry vykorystanni transportuiuchykh orhaniv shvejnykh mashyn z plazmovym napyleniam [Theoretical study of the dynamic interaction effect in the use of transporting mechanisms of sewing machines with plasma deposition]. *44 naukova ta 12 nauково-методична конференція КТІЛП = 44th Scientific and 12th Scientific-Methodical Conference of КТІЛП*. Kyiv. P. 2 [in Ukrainian].
58. Horobets, V. A., Shcherban, Yu. Yu., Nosov, M. S. (1988). Vyznachennya posadky materialu pry vysokoshvydkisnomu rezhymi transportuvannya na shveynykh mashynakh [Determination of material fit during high-speed transportation on sewing machines]. *Vidomosti vuziv. Tekhnolohiia lehkoi promyslovosti = University News. Light industry technology*, No. 2, P. 119–121 [in Ukrainian].
59. Scherban, Yu. Yu. (1992). Do pytannia schodo identyfikatsii matematychnykh modelej mekhanizmiv shvejnykh mashyn [Regarding the identification of mathematical models of sewing machine mechanisms]. *44 naukova ta 12 nauково-методична конференція КТІЛП = 44th Scientific and 12th Scientific-Methodical Conference of КТІЛП*. Kyiv. P. 25 [in Ukrainian].
60. Pyschikov, V. O., Orlovskiy, B. V. (2007). Proektuvannya shvejnykh mashyn [Designing sewing machines]. Kyiv: Publishing and Printing House "Format". URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/4514> [in Ukrainian].
61. Horobets, V. A., inventors (2019). Mekhanizm peremischennia materialiv shvejnoi mashyny [Mechanism of material displacement in a sewing machine]. Ukrainian patent, No 132870 [in Ukrainian].
62. DDL-9000CS Series [Digital]. URL: <https://www.juki.co.jp/partslist/product/?cd=1689-11&num=5#num5>.
54. Щербань Ю. Ю., Горобець В. А. Розробка раціональних умов взаємодії робочих органів швейних машин. Київ: 1990. 9 с. Деп. в УкрНІІНТІ 14.12.90 №943-Ук90.
55. Jankoska M., Demboski G. The influence of the sewing speed and fabric thickness on sewing machine stitch formation parameters. *Advanced Technologies*. 2017. Vol. 6, № 2. P. 72–77. <https://doi.org/10.5937/savteh1702072j>.
56. Carvalho M. A., Demboski G., Nofitoska M. Study of the presser foot displacement in a lockstitch sewing machine. *Textile Science and Economy: 5th International Scientific-Professional Conference* (November 05–06, 2013). Zrenjanin, Serbia, 2013. P. 144–148.
57. Щербань Ю. Ю. Теоретичне дослідження ефекту динамічної взаємодії при використанні транспортуючих органів швейних машин з плазмовим напиленням. *Матеріали 44 наукової та 12 науково-методичної конференцій КТІЛП*. Київ, 1992. С. 2.
58. Горобець В. А., Щербань Ю. Ю., Носов М. С. Визначення посадки матеріалу при високошвидкісному режимі транспортування на швейних машинах. *Відомості вузів. Технологія легкої промисловості*. 1988. № 2. С. 119–121.
59. Щербань Ю. Ю. До питання щодо ідентифікації математичних моделей механізмів швейних машин. *Матеріали 44 наукової та 12 науково-методичної конференцій КТІЛП*. Київ, 1992. С. 25.
60. Пишиков В. О., Орловський Б. В. Проектування швейних машин. Київ: Видавничо-поліграфічний дім "Формат", 2007. 320 с. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/4514>.
61. Горобець В. А., винахідник. Механізм переміщення матеріалів швейної машини. України патент No 132870, 2019.
62. DDL-9000CS Series [Digital]. URL: <https://www.juki.co.jp/partslist/product/?cd=1689-11&num=5#num5>.

63. Horobets, V. A., Dvorzhak, V. M. (2018). Rozrobka i syntez novoho mekhanizmu transportu shveynoyi mashyny [Development and synthesis of a new mechanism for transporting a sewing machine]. *Visnyk KNUTD. Seriya Tekhnichni nauky = Bulletin of KNUTD. Technical Sciences Series*, Vol. 126, Iss. 5, P. 33–39. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2018.5.3> [in Ukrainian].
64. Horobets, V. A., Manojlenko, O. P., Dvorzhak, V. M. (2024). Porivnialnyj analiz mekhanizmiv peremischennia materialiv shvejnykh mashyn [Comparative analysis of material displacement mechanisms in sewing machines]. *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems: XIV Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia (23–24 travnia 2024) = XIV International Scientific-Practical Conference*, Chernihiv, P. 347–348 [in Ukrainian].
65. Pyschikov, V. O., Poladych, I. V., inventors (2009). Mekhanizm transportuvannia materialu shvejnoi mashyny [Mechanism of material transport in a sewing machine]. Ukrainian patent, No 45116 [in Ukrainian].
66. Tereschenko, O. P., Listvin, K. V. (2013). Doslidzhennya mekhanizmu transportuvannia materialu shveynoyi mashyny lanchuhovoho typu [Investigation of the material transportation mechanism of a chain-type sewing machine]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky = Bulletin of Khmelnytskyi National University. Series: Technical Sciences*, No. 3, P. 255–259 [in Ukrainian].
67. Ilieva, P. K. B., Anchev, R. R., Atanasova, B. E. (2018). Method for synthesis of mechanism for the material transportation of sewing machines through the kinematic geometry instrument. *World Science*, Vol. 1, Iss. 2 (30), P. 16–21.
68. Shcherban, Yu. Yu. (1989). Doslidzhennya yakosti obrobky napivfabrykativ vyrobiv pry kombinovanii reykovii podachi [Investigation of the quality of processing semi-finished products in combined rail feed]. Kyiv: Deposited at UkNIINTI 03.12.89 №227-Uk89 [in Ukrainian].
69. Shcherban, Yu. Yu. (1990). Rozrobka shveynoho obladnannya dlya realizatsii osnovnykh metodiv diferentsiialnoho peremishchennia materialu [Development of sewing equipment for implementing basic methods of differential material displacement]. Kyiv: Deposited at CBTI Minlehprom 29.11.90 №530-100 [in Ukrainian].
70. Shcherban, Yu. Yu. (1989). Mashyny z kombinovanim mekhanizmom peremishchennia materialu [Machines with a combined mechanism for material movement]. *Lehka promislovist = Light Industry*, No. 3, P. 23–25 [in Ukrainian].
71. Shcherban, Yu. Yu., Horobets, V. A. (1986). Doslidzhennya mekhanizmiv peremishchennia materialu shveynoyi mashyny z verkhnoyu ta nizhn'oyu transportuyuchymu reykamy. (Povidomlennya 1)
63. Горобець В. А., Дворжак В. М. Розробка і синтез нового механізму транспорту швейної машини. *Вісник КНУТД. Серія Технічні науки*. 2018. Т. 126, № 5. С. 33–39. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2018.5.3>.
64. Горобець В. А., Манойленко О. П., Дворжак В. М. Порівняльний аналіз механізмів переміщення матеріалів швейних машин. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції (23–24 травня 2024 р)*. Чернігів, 2024. С. 347–348.
65. Пищиков В. О., Поладич І. В. винахідники. Механізм транспортування матеріалу швейної машини. України патент № 45116, 2009.
66. Терещенко О. П., Ліствін К. В. Дослідження механізму транспортування матеріалу швейної машини ланцюгового типу. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2013. № 3. С. 255–259.
67. Ilieva P. K. B., Anchev R. R., Atanasova B. E. Method for synthesis of mechanism for the material transportation of sewing machines through the kinematic geometry instrument. *World Science*. 2018. Vol. 1, № 2 (30). P. 16–21.
68. Щербань Ю. Ю. Дослідження якості обробки напівфабрикатів виробів при комбінованій рейкової подачі. Київ: 1989. 9 с. Деп. в УкрНІНТІ 03.12.89 №227-Ук89.
69. Щербань Ю. Ю. Розробка швейного обладнання для реалізації основних методів диференціального переміщення матеріалу. Київ: 1990. 5 с. Деп. в ЦБТІ Мінлепром 29.11.90 №530-100.
70. Щербань Ю. Ю. Машини з комбінованим механізмом переміщення матеріалу. *Легка промисловість*. 1989. № 3. С. 23–25.
71. Щербань Ю. Ю., Горобець В. А. Дослідження механізмів переміщення матеріалу швейної машини з верхньою та нижньою транспортуючими рейками.

- [Investigation of mechanisms for material movement of sewing machines with upper and lower transport rails. (Report 1)]. *Vidomosti vuziv. Tekhnolohiya lehkoyi promyslovosti = University News. Light Industry Technology*, No. 2, P. 119–122 [in Ukrainian].
72. Shcherban, Yu. Yu., Horobets, V. A. (1986). Doslidzhennya mekhanizmiv peremishchennya materialu shveynoyi mashyny z verkhnoyu ta nizhn'oyu transportuyuchymy reykamy. (Povidomlennya 2) [Investigation of mechanisms for material movement of sewing machines with upper and lower transport rails. (Report 2)]. *Vidomosti vuziv. Tekhnolohiya lehkoyi promyslovosti = University News. Light Industry Technology*, No. 3, P. 105–110 [in Ukrainian].
73. Muramatsu, N. (1996). Motion of Top Feed Mechanism of an Industrial Sewing Machine. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference: 22nd Design Automation Conference* (6 p.), Irvine, California, USA. <https://doi.org/10.1115/96-detc/dac-1054>.
74. Shcherban, Yu. Yu., Horobets, V. A. (1990). Doslidzhennya ta optymizatsiya parametriv mekhanizmiv shveynykh mashyn dlya z'iednannya vazhkykh materialiv [Investigation and optimization of parameters of mechanisms of sewing machines for joining heavy materials: Zvit Scientific research work]. Kyiv: KTILP, State Register 01.90.0050122 [in Ukrainian].
75. Shcherban, Yu. Yu. (1990). Do pytannia uzgodzhennia vzaємодії robochykh orhaniv shvejnykh mashyn [On the issue of coordinating the interaction of working mechanisms in sewing machines]. *XXLII naukova ta X naukovo-metodychna konferentsiia KTILP = XLII Scientific and X Scientific-Methodical Conference of KTILP*. Kyiv. P. 57 [in Ukrainian].
76. Shcherban, Yu. Yu. (1990). Rekonstruktsiya shveynoyi mashyny dlya obrobky vyrobiv zi zustrichnymy shvamy ta lokal'nymy potovshchennyamy [Reconstruction of a sewing machine for processing products with counter seams and local thickenings]. Kyiv: Deposited at CBTI Minlehprom 29.11.90 №531-100 [in Ukrainian].
77. Shcherban, Yu. Yu., Horobets, V. A. (1990). Shveynyy ahrehat dlya obrobky trubchastykh vyrobiv z shchil'nykh materialiv [Sewing unit for processing tubular products made of dense materials]. Kyiv: Deposited at UknIINTI 29.11.90 №523-100 [in Ukrainian].
78. Zhang, C. R. L., Norton, P. E., Hammonds, T. (1984). Optimization of parameters for specified path generation using an atlas of coupler curves of geared five-bar linkages. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 19, Iss. 6, P. 459–466. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(84\)90052-1](https://doi.org/10.1016/0094-114X(84)90052-1).
- (Повідомлення 1). *Vidomosti vuziv. Tekhnolohiya lehkoyi promyslovosti*. 1986. № 2. С. 119–122.
72. Щербань Ю. Ю., Горобець В. А., Дослідження механізмів переміщення матеріалу швейної машини з верхньою та нижньою транспортуючими рейками. (Повідомлення 2). *Vidomosti vuziv. Tekhnolohiya lehkoyi promyslovosti*. 1986. № 3. С. 105–110.
73. Muramatsu, N. (1996). Motion of Top Feed Mechanism of an Industrial Sewing Machine. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference: 22nd Design Automation Conference* (August 18–22, 1996). Irvine, California, USA. 6 p. <https://doi.org/10.1115/96-detc/dac-1054>.
74. Щербань Ю. Ю., Горобець В. А., Дослідження та оптимізація параметрів механізмів швейних машин для з'єднання важких матеріалів: Звіт НІР. Київ: КТІЛП, 1990. 68 с. Держ. реєстр. 01.90.0050122.
75. Щербань Ю. Ю. До питання узгодження взаємодії робочих органів швейних машин. *Матеріали ХХІІ наукової та Х науково-методичній конференції КТІЛП*. Київ, 1990. С. 57.
76. Щербань Ю. Ю. Реконструкція швейної машини для обробки виробів зі зустрічними швами та локальними потовщеннями. Київ: 1990. 4 с. Деп. в ЦБТІ Мінлеппром 29.11.90 №531-100.
77. Щербань Ю. Ю., Горобець В. А. Швейний агрегат для обробки трубчастих виробів з щільних матеріалів. Київ: 1990. 3 с. Деп. в ЦБТІ Мінлеппром 29.11.90 №523-100.
78. Zhang C. R. L., Norton P. E., Hammonds T. Optimization of parameters for specified path generation using an atlas of coupler curves of geared five-bar linkages. *Mechanism and Machine Theory*. 1984. Vol. 19, № 6. P. 459–466. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(84\)90052-1](https://doi.org/10.1016/0094-114X(84)90052-1).

79. Watkins, R. P. (2020). Domestic Sewing Machine Attachments. URL: <https://www.watkinsr.id.au/PresserFeet.pdf>.
80. Karthik, T., Ganesan, P., Gopalakrishnan, D. (2016). Apparel Manufacturing Technology. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315367507>.
79. Watkins R. P. Domestic Sewing Machine Attachments. 2020. URL: <https://www.watkinsr.id.au/PresserFeet.pdf>.
80. Karthik T., Ganesan P., Gopalakrishnan D. Apparel Manufacturing Technology. CRC Press, 2016. <https://doi.org/10.1201/9781315367507>.

KOROBCHENKO EVHENYI

Postgraduate Student,
Department of Mechanical Engineering,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6026-1427>
E-mail: korobchenko.yo@knuud.edu.ua

HOROBETS VASYL

Candidate of Sciences in Engineering, Professor,
Department of Mechanical Engineering,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5174-3224>
E-mail: horobets.vs@knuud.edu.ua

KRYKUN EVHENII

Student, Department of Mechanical Engineering,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: Krykun.yv@knuud.edu.ua

KOROBCHENKO E., HOROBETS V., KRYKUN E.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**IMPROVING THE QUALITY OF THE MATERIAL
TRANSPORT PROCESS IN SEWING MACHINES**

Purpose. Conduct an analysis of the impact of the structure and design parameters of material displacement mechanisms and their working elements on the operational performance quality of the sewing machine to identify areas for improvement.

Methodology. A well-known method of analytical review of information sources dedicated to addressing the aforementioned issue has been applied.

Findings. As a result of the research of literary sources, it was found that the operational performance of sewing machines, and thus the quality of their work in the material displacement mechanism, is influenced by the following factors: the material and mass of the presser foot, the physical and mechanical properties of its surface, and the parameters of the dynamic system "presser foot-material-transporting mechanism" (including the pressure force applied to the material against the throat plate during transport and the dimensions of the presser foot). The construction of the transporting mechanism, the shape and condition of its working surface, its motion law and trajectory, especially in the presence of several transporting mechanisms considering their compatibility, are also important. Despite various measures proposed to improve the machine's operational performance, complete elimination of negative phenomena in the material transport process is not achieved. A radical improvement in the quality of material transport in sewing machines is possible only through the development of fundamentally new creative methods and means of transportation that can ensure equal conditions for moving the upper and lower layers of material.

Originality. The scientific novelty of this research lies in revealing the essence of the impact of parameters (and their combinations) of transport mechanisms and their working elements on the quality of sewing products; in identifying the shortcomings of known processes and mechanisms for material transport in sewing machines; and in determining the main directions for improving the quality of their operational performance.

Practical value. The results of the analysis can be used for the targeted development of new, more promising methods, devices, and mechanisms for material displacement in sewing machines.

Keywords: operational performance; material displacement mechanism; transporting element; feed; gathering; feed dog; presser foot.

УДК 621.
865.8:
687.053

МІСЯЦЬ М. В., ОРЛОВСЬКИЙ Б. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО ЗАХОПЛЮВАЧА ДЕТАЛЕЙ КРОЮ З ТЕКСТИЛЮ ЗІ СТОСУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ШВЕЙНИХ МАШИН

Мета. Автоматизація завантаження швейних машин деталями крою на засадах параметричного синтезу з метою оптимізації процесу поштучного відокремлення від пачки деталей крою аеродинамічним захоплювачем швейного маніпулятора та визначення найбільш раціонального поєднання параметрів, які характеризують критерій оптимізації базування деталей крою з текстилю відносно їх центру мас і одного з конструктивних параметрів аеродинамічної пластини захоплювача швейного маніпулятора.

Методика. Для оптимізації процесу поштучного відокремлення від пачки деталей крою з текстилю застосована методика теорії планування і аналізу багато факторного експерименту для запропонованого узагальненого показника якості побудованих експериментально-статистичних моделей і для визначення екстримальних значень параметрів процесу поштучного відділення за допомогою аеродинамічного способу та пристрою діади «захоплювач швейного маніпулятора – деталь крою з текстилю» при найбільш раціональному поєднанні значимих параметрів.

Результат. Для оптимізацію процесу поштучного відокремлення від пачки деталей крою з текстилю аеродинамічним захоплювачем розроблено експериментальну установку і виконано чисельний експеримент. Побудовано графічні номограми двомірних перерізів поверхонь відгуку цільової функції для інженерних розрахунків конструктивних параметрів і робочого процесу аеродинамічного захоплювача швейного маніпулятора завантаження машин деталями крою з текстилю різних груп швейних виробів. Виконано графічну інтерпретацію та чисельні розрахунки отриманих формул та математичних моделей для оптимізації процесу поштучного відділення з пачки текстильних деталей крою за допомогою аеродинамічного способу та пристрою для проектування механіко-технологічної пари «захоплювач швейного маніпулятора – деталь крою з текстилю» при найбільш раціональному поєднанні параметрів, які характеризують процес базування деталей крою з текстилю відносно їх центру мас і один з конструктивних параметрів аеродинамічної пластини захоплювача швейного маніпулятора.

Наукова новизна: полягає в розкритті закономірностей оптимізація параметрів аеродинамічного захоплювача деталей крою з текстилю зі стосу для автоматизованого завантаження швейних машин за результатами центрального рототабельного композиційного плану експерименту 2-го порядку (ЦРКПЕ-2) при скоригованих нульових рівнях керованих параметрів: $p = 1,5 \cdot 10^5 \frac{H}{m^2}$ (Па), $l_y = 62,5$ мм, $l_c = 35,0$ мм та реалізованої матриці ЦРКПЕ-2 розміром 20x8 (20 серій дослідів по 8 повторень). Виконані статистичні оцінки, які дозволили отримати адекватні процесу поштучного відділення текстильних деталей крою зі стопки математичні моделі 2-го порядку для трьох критеріїв оптимізації Y_c , Y_k , Y_n – тривалості циклу поштучного відділення зі стопки деталей крою з тканин сорочкової костюмної та пальтової груп

Практична значимість: розроблений метод параметричного синтезу для визначення оптимальних параметрів аеродинамічного захоплювача і циклу поштучного відокремлення деталей крою з текстилю зі стосу на підставі теоретичного обґрунтування і експериментального дослідження взаємодії робочого середовища з деталями крою сорочкової, пальтової та костюмної групи.

Ключові слова: параметричний синтез; оптимізація; захоплювач; швейний маніпулятор; статистичні моделі; графічні номограми; деталі крою з текстилю.

Вступ. Швейні машини [1, 2] з маніпулятором [3] автоматичного завантаження деталями крою з текстилю переходять у клас роботизованого обладнання цільового

призначення, якщо процес автоматизованого поштучного відділення текстильних деталей з пачки та завантаження складаються з наступних основних етапів циклу роботи швейного маніпулятора.

1 – контакт робочого інструменту або робочого середовища для захоплення верхньої ворсистої та повітропроникної поверхні «а» і-тої деталі немагнітного м'якого листового матеріалу, а саме контакт з деталлю крою;

2 – контактне або безконтактне проникнення робочого інструменту або робочого середовища всередину верхньої *i-moi* деталі;

3 – руйнування контакту взаємодії між нижньою ворсистією поверхнею «в» *i-moi* деталі з верхньою ворсистією поверхнею «а» *i+I* деталі крою в пачці;

4 – частковий або повний поділ *i-moi* та *i+I* деталей;

5 – переміщення *i-moi* деталі крою в зону голкової пластини та притискної лапки швейної машини

6 – розщеплення робочого інструменту (робочого середовища) з поверхнею «а» *i-moi* деталі в зоні голкової пластини та притискної лапки швейної машини для подальшої технологічної операції обметування краю на машинах типу *overlock* або пауза для повторення пунктів 1–6 наступного циклу з деталлю *i+I* на машинах типу *lockstitch*.

В роботі авторів [4] виконаний порівняльний аналіз функціонально-адекватних захватів маніпуляторів завантаження швейних машин деталями крою з текстилю з метою обґрунтованого вибору аеродинамічного захоплювача деталей крою з текстилю зі стосу для автоматизованого завантаження швейних машин. А в роботі [5] розроблена аналітична модель і виконані розрахунки аеродинамічного захоплювача деталей крою з текстилю зі стосу маніпуляторів завантаження швейних машин.

Теоретичні основи побудови багатofакторних нелінійних експериментально статистичних моделей 2-го порядку і стратегія експериментування, аналізу даних та інтерпретацію експериментальних результатів розглянути у роботах [6–17].

Постановка завдання. Виконання параметричного аналізу та визначення раціональних параметрів струменевих пневматичних пристроїв що дозволять провести оптимізацію процесу поштучного відділення деталей крою від пачки при деяких обмеженнях, що накладаються на один із керованих факторів, не вдаючись до громіздких розрахунків за рівняннями (4)–(6) для аеродинамічних захоплювачів швейних маніпуляторів. Побудувати графічні номограми двомірних перерізів поверхонь відгуку цільової функції для інженерних розрахунків конструктивних параметрів і робочого процесу аеродинамічного захоплювача швейного маніпулятора завантаження машин деталями крою з текстилю різних груп швейних виробів.

Результати дослідження. Запропоновані побудовані графічні номограми можуть бути використані при проектуванні теоретичних циклограм роботи швейних машин з модулями автоматичного завантаження деталей крою з текстилю розміром до 300x150 мм. Також отримані графічні номограми доцільно використовувати для інженерних розрахунків конструктивних параметрів та інших струменевих пневматичних пристроїв.

Цільова функція $Y(p, l_{ц}, l_c) \rightarrow \min$ при обмеженнях: $0,37 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \leq p \leq 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$; $10 \text{ мм} \leq l_{ц} \leq 110 \text{ мм}$; $20 \text{ мм} \leq l_c \leq 65 \text{ мм}$.

Цільову функцію знаходимо у вигляді двомірних перерізів поверхонь відгуку для тканин сорочкової Y_c , костюмною Y_k , та пальтової Y_p , груп при дії обраних апріорі керованих незалежних змінних: x_1 – тиск p в пневмо мережі, x_2 – положення центру маси $l_{ц}$ деталі крою, що відділяється зі стосу щодо бази аеродинамічної пластини і x_3 – довжини сопла l_c .

Для визначення оптимальних [18] режимів роботи і конструктивних параметрів аеродинамічного захоплювача [19]–[21] текстильних деталей крою плаття-сорочкової,

костюмної і пальтової груп розроблена експериментальної установки, комбінована схема якої наведена на рис. 1.

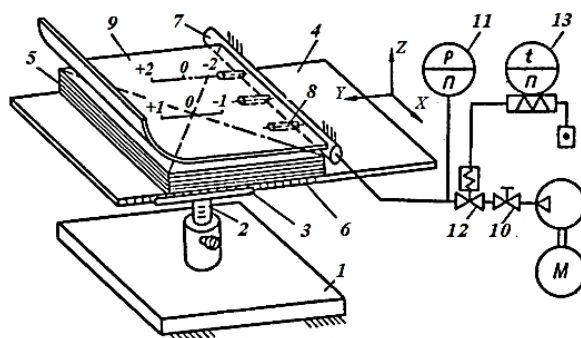


Рис. 1. Комбінована схема експериментальної установки для визначення режимів роботи і конструктивних параметрів захоплювача текстильних деталей крою плаття-сорочкової, костюмної і пальтової груп

Експериментальна установка складається зі станини 1, стійки 2, у напрямних 3 якої може переміщатися по висоті осі Z столик 4 з деталями крою з текстилю 5. Величина переміщення центру мас деталей крою по горизонталі по осі X напрямних вимірюється за допомогою шкали 5 з граничною абсолютною похибкою 1,0 мм. На столику змонтовані колектор 7 зі змінними соплами 8 і аеродинамічна пластина 9. Тиск повітря від пневмогенератора задається і контролюється вентилем 10 і манометром 11 з граничною абсолютною похибкою $5 \cdot 10^2 \frac{H}{M^2}$. Електромагнітний клапан 12 та електросекундомір 13 служать для фіксації часу відділення деталей крою, величина якого оптимізується. Гранична відносна похибка вимірювання параметра оптимізації та керованих змінних параметрів становить 2%.

Радіус козирка аеродинамічної пластини $R_K = 50$ мм, перетин сопел $S_c = 2,5$ мм² і висота турболізатора $h_T = 1,0$ мм залишалися постійними.

За результатами повного факторного експерименту ПФЕ 2^3 [6, 7], в якому нульовий рівень факторів $x_1 := p = 1,88 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2}$, $x_2 := l_{ц} = 37,5$ мм, $x_3 := l_c = 40,0$ мм та інтервали їх варіювання, відповідно, $\Delta p = 0,375 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2}$, $\Delta l_{ц} = 20,0$ мм, $\Delta l_c = 15,0$ мм для трьох груп тканин отримані наступні рівняння:

$$Y_c = 0,398 + 0,076x_2 + 0,080x_3 + 0,076x_1x_2; \quad (1)$$

$$Y_k = 0,250 - 0,021x_1 + 0,047x_3 - 0,021x_1x_3; \quad (2)$$

$$Y_n = 0,291 - 0,052x_1 + 0,052x_1x_2. \quad (3)$$

Рівняння (1)–(3), є адекватними досліджуваному процесу оскільки розрахункові значення критерію Фішера $F_c = 2,91$, $F_k = 1,13$, $F_n = 1,63$ виявилися менше табличного значення критерію Фішера $F_{табл} = 4,12$ [6]. Одночасно ці рівняння виявилися нелінійними зважаючи на значущість ефектів взаємодії керованих параметрів x_1x_2 та x_1x_3 . Тому план ПФЕ 1-го порядку був доповнений дослідями на рівнях $\pm 1,682$ і в нульових точках для центрального рототабельного композиційного плану експерименту 2-го порядку (ЦРКПЕ-2) при скоригованих нульових рівнях керованих параметрів: $p = 1,5 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2}$, $l_{ц} = 62,5$ мм, $l_c = 35,0$ мм.

Реалізація матриці ЦРКПЕ-2 розміром 20x8 (20 серій дослідів по 8 повторень) та виконані статистичні оцінки дозволили отримати наступні адекватні процесу поштучного

відділення текстильних деталей крою зі стопки математичні моделі 2-го порядку в кодованих значеннях керованих параметрів x_1, x_2, x_3 [6]:

$$Y_c = 0,285 - 0,032x_1 - 0,013x_2 + 0,030x_1^2 - 0,012x_2^2 - 0,035x_3^2; \quad (4)$$

$$Y_k = 0,385 - 0,032x_1 - 0,029x_2 + 0,023x_3 - 0,012x_1^2 - 0,006x_2^2 - 0,045x_3^2 + 0,010x_1x_3 + 0,043x_2x_3; \quad (5)$$

$$Y_n = 0,358 - 0,043x_1 - 0,023x_2 + 0,044x_3 + 0,010x_1^2 + 0,017x_2^2 + 0,028x_3^2 - 0,011x_1x_2 + 0,015x_1x_3 + 0,011x_2x_3, \quad (6)$$

де Y_c, Y_k, Y_n – критерії оптимізації тривалості циклу поштучного відділення зі стопки деталей крою з тканин сорочкової костюмної та пальтової груп.

З урахуванням формул переходу від кодованих значень керуючих факторів до іменованих значень керованих факторів $x_1 = \Delta p^{-1}(p - p_0)$, $x_2 = \Delta l_c^{-1}(l_c - l_{c0})$, $x_3 = \Delta l_c^{-1}(l_c - l_{c0})$ рівняння (4)...(6) приведені до наступного вигляду:

$$Y_c = 0,627 - 0,723p + 0,003l_c + 0,212p^2 - 0,003 \cdot 10^{-2}l_c^2 - 0,017 \cdot 10^{-2}l_c^2; \quad (7)$$

$$Y_k = 0,485 - 0,109p - 0,452 \cdot 10^{-2}l_c + 0,394 \cdot 10^{-2}l_c - 0,085p^2 - 0,015 \cdot 10^{-3}l_c^2 - 0,022 \cdot 10^{-2}l_c^2 + 0,186 \cdot 10^{-2}p \cdot l_c + 0,015 \cdot 10^{-2}l_c \cdot l_c; \quad (8)$$

$$Y_n = 1,163 - 0,303p - 0,008l_c - 0,155 \cdot 10^{-1}l_c + 0,707 \cdot 10^{-1}p^2 + 0,425 \cdot 10^{-4}l_c^2 + 0,137 \cdot 10^{-3}l_c^2 - 0,146 \cdot 10^{-2}p \cdot l_c + 0,205 \cdot 10^{-2}p \cdot l_c + 0,105 \cdot 10^{-3}l_c \cdot l_c. \quad (9)$$

Аналіз рівнянь (7)–(9) на міні-макс методом невизначених множників Лагранжа дозволив отримати екстремальні значення критерія оптимізації \hat{Y}_S , які зведені в таблицю 1, де також наведено значення координат у кодованих значеннях x_{1S}, x_{2S}, x_{3S} та в поіменованих значеннях p_S, l_{cS}, l_{cS} умовного екстремуму поверхонь відгуку для досліджених областей факторного простору.

Таблиця 1

Розрахункові значення величини та координат умовного екстремуму критерію оптимізації

Група тканин	Вага матеріалу, $\frac{\Gamma}{\text{м}^2}$	x_{1S}	$p_S \cdot 10^{-5}, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	x_{2S}	$l_{cS}, \text{мм}$	x_{3S}	$l_{cS}, \text{мм}$	\hat{Y}_S
Сорочкові	100 ÷ 120	0,53	1,70	-0,51	52,5	0	35	0,28
Костюмні	200 ÷ 220	-0,75	1,03	2,53	112,5	1,0	50	0,37
Пальтові	300 ÷ 420	2,20	2,32	0,75	87,5	0,75	46	0,39

Як випливає з таблиці 1, всі отримані екстремальні значення керованих параметрів опинилися в області експерименту, що підтверджує правильність вибору меж факторного простору та інтервалів варіювання факторів.

Для визначення виду поверхонь відгуку цільових функцій рівняння (4)–(6) перетворені на відповідні їм наступні рівняння в канонічній формі:

$$Y_c - 0,28 = 0,030X_1^2 - 0,035X_2^2 - 0,012X_3^2; \quad (10)$$

$$Y_k - 0,37 = -0,055X_1^2 + 0,004X_2^2 - 0,012X_3^2; \quad (11)$$

$$Y_{\pi} - 0,39 = 0,038X_1^2 + 0,004 \cdot 10^{-1}X_2^2 + 0,016X_3^2, \quad (12)$$

де X_1, X_2, X_3 – перетворені осі координат, які перенесені в центр фігури з координатами x_{1S}, x_{2S}, x_{3S} і повернені в факторному просторі щодо старих осей (рис. 2).

Коефіцієнти рівнянь (10) ... (11) були отримані рішенням кубічних рівнянь виду:

$$B^3 + \alpha B^2 + \beta B + \gamma = 0, \quad (13)$$

де α, β, γ – напрямні кути в радіанах перетворених осей координат X_1, X_2, X_3 , які пов'язані з коефіцієнтами b_i, b_{ii}, b_{ij} рівнянь (7)–(9) наступними залежностями:

$$\alpha = -(b_{11} + b_{22} + b_{33}); \quad (14)$$

$$\beta = [b_{11}b_{33} + b_{22}b_{33} + b_{11}b_{22} - 0,25(b_{12}^2 + b_{23}^2 + b_{13}^2)]; \quad (15)$$

$$\gamma = [-b_{11}b_{22}b_{33} + 0,25(b_{12}b_{13}b_{23} - b_{22}b_{13}^2 - b_{33}b_{12}^2 - b_{11}b_{23}^2)]. \quad (16)$$

Розраховані значення напрямних кутів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Напрямні кути в радіанах до рівняння (13)

$\alpha_c = 0,017$	$\beta_c = -0,099 \cdot 10^{-2}$	$\gamma_c = 0,126 \cdot 10^{-4}$
$\alpha_k = 0,063$	$\beta_k = 0,039 \cdot 10^{-2}$	$\gamma_k = -0,246 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_{\pi} = -0,055$	$\beta_{\pi} = 0,064 \cdot 10^{-2}$	$\gamma_{\pi} = 0,024 \cdot 10^{-5}$

Канонічні рівняння (10) і (11) описують поверхні відгуку типу мінімаксу, а канонічне рівняння (12) відповідає поверхні відгуку типу еліпсоїд.

Вивчення області екстремуму канонічних рівнянь (10)–(12) проведено шляхом побудови та подальшого аналізу перерізів поверхонь відгуку паралельними площинами. В результаті одержано графічні номограми (рис. 2–4) для інженерних розрахунків прийнятого критерія оптимізації Y_S процесу поштучного відділення деталей крою сорочкової, костюмної і пальтової груп від пачки при деяких обмеженнях, що накладаються на один із керованих факторів. На рис. 2 наведені графічні номограми двомірних перерізів поверхонь відгуку для інженерних розрахунків оптимальних режимів роботи аеродинамічного захоплювача швейного маніпулятора для деталей крою сорочкової групи.

На рис. 2 (а, б, в), для екстремального значення $\hat{Y}_S = 0,28$ (таблиця 1) наведено графічні номограми $l_c(l_{\text{ц}})$ при $p = 1,69 \cdot 10^5 \frac{\text{H}}{\text{м}^2} = \text{const}$, $l_c(p)$ при $l_{\text{ц}} = 52,5 \text{ мм} = \text{const}$ та $l_{\text{ц}}(p)$ при $l_c = 35 \text{ мм} = \text{const}$ для тканин сорочкової групи. Величина знайдених значень екстремальних параметрів критерію оптимізації $\hat{Y}_{S_c} = 0,28$ для деталей крою сорочкової групи збільшується при русі від центру двомірних перерізів по одній осі і зменшується при русі по іншій осі для поверхонь відгуку типу міні-макс.

На рис. 3 наведені двомірні перерізи поверхонь відгуку у вигляді графічних номограм для інженерних розрахунків оптимальних параметрів аеродинамічного захоплювача деталей крою з текстилю костюмної групи.

На рис. 3 (а, б), для екстремального значення $\hat{Y}_S = 0,37$ (таблиця 1) наведено графічні номограми $l_c(l_{\text{ц}})$ при $p = 1,03 \cdot 10^5 \frac{\text{H}}{\text{м}^2} = \text{const}$ та $l_c(p)$ при $l_{\text{ц}} = 112,5 \text{ мм} = \text{const}$ для тканин костюмної групи. Величина знайдених значень екстремальних параметрів критерію

оптимізації $\hat{Y}_{S_k} = 0,37$ для деталей крою костюмної групи значення екстремуму функцій зменшується по двох осях поверхонь відгуку типу еліпсоїда.

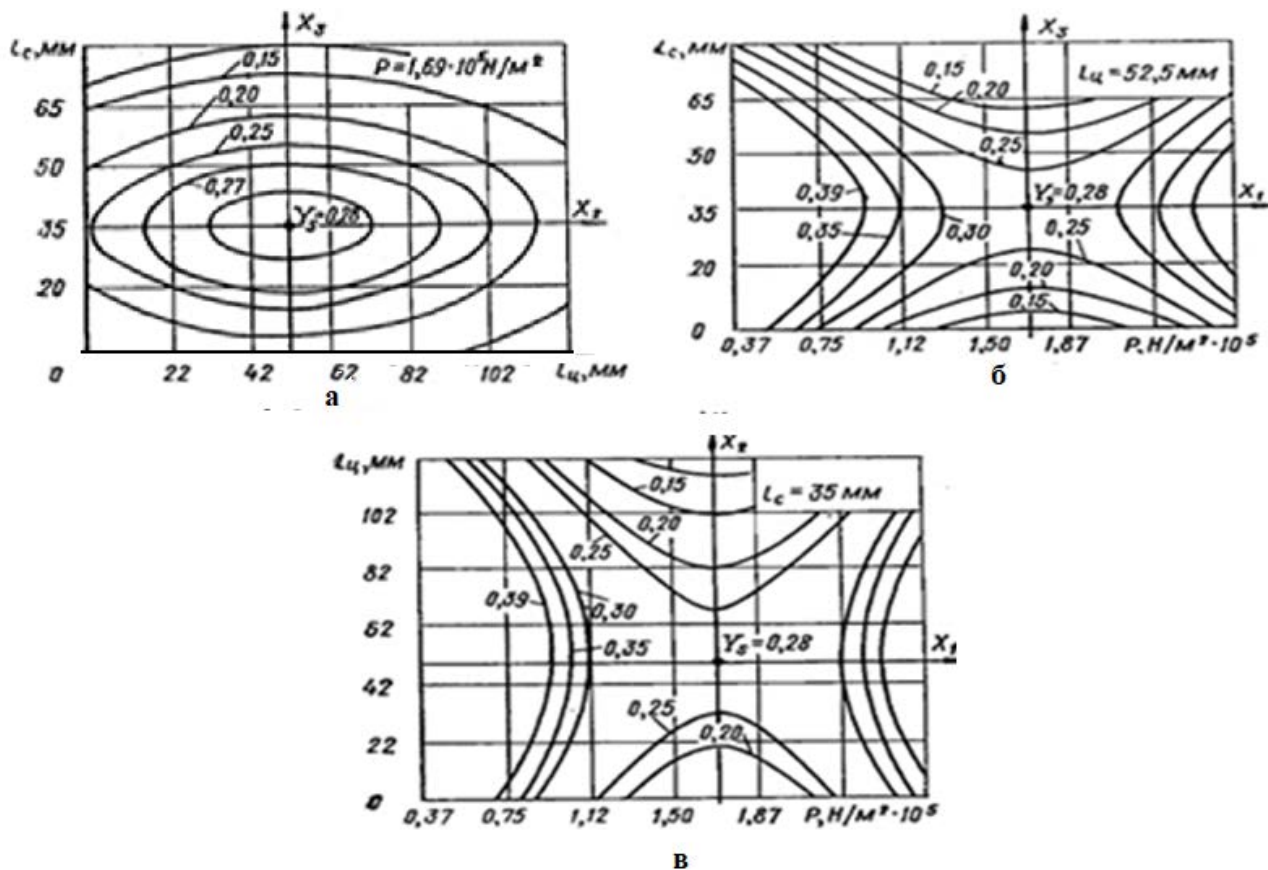


Рис 2. Графічні номограми двовірних перерізів поверхонь відгуку для інженерних розрахунків оптимальних режимів роботи аеродинамічного захоплювача швейного маніпулятора для деталей крою сорочкової групи

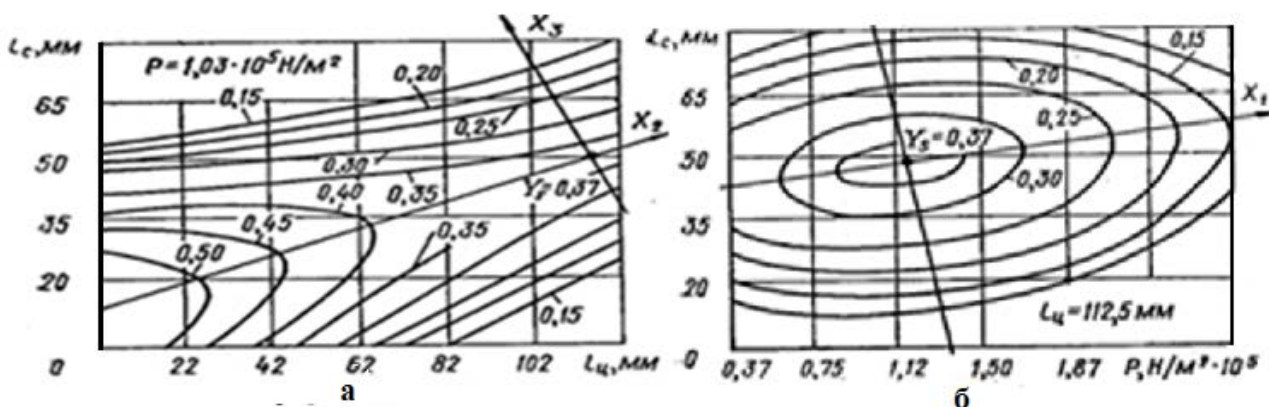


Рис 3. Графічні номограми двовірних перерізів поверхонь відгуку для інженерних розрахунків оптимальних режимів роботи аеродинамічного захоплювача швейного маніпулятора для деталей крою костюмної групи

На рис. 4 наведені графічні номограми двовірних перерізів поверхонь відгуку для інженерних розрахунків оптимальних режимів роботи аеродинамічного захоплювача швейного маніпулятора для деталей крою пальтової групи.

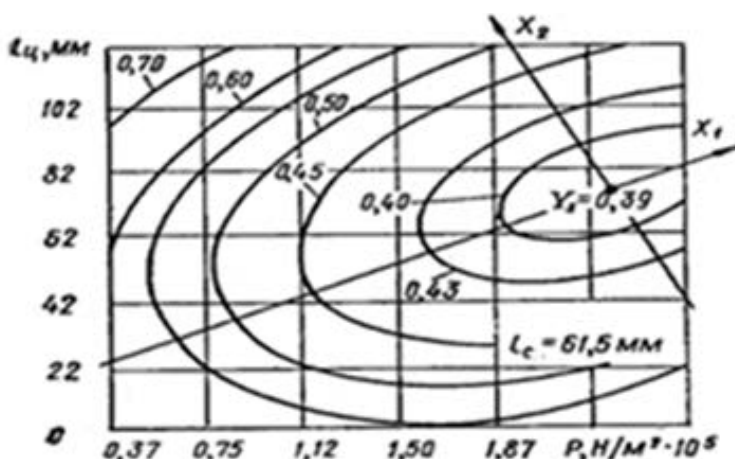


Рис. 4. Графічна номограма двовірних перерізів поверхонь відгуку для інженерних розрахунків оптимальних режимів роботи аеродинамічного захоплювача швейного маніпулятора для деталей крою пальтової групи

На рис. 4. для екстремального значення $\hat{Y}_S = 0,39$ (таблиця 1) наведено графічну номограму $l_c(p)$ при $l_c = 61,5 \text{ мм} = \text{const}$ для тканин пальтової групи. Величина знайдених значень екстремальних параметрів критерію оптимізації $\hat{Y}_{S_{\text{opt}}} = 0,39$ для деталей крою пальтової групи значення екстремуму функцій зменшується по двох осях поверхонь відгуку типу еліпсоїда.

Висновки. Побудовані графічні номограми (рис. 2–4) для інженерних розрахунків прийнятого критерія оптимізації Y_S процесу поштучного відділення деталей крою сорочкової, костюмної і пальтової груп від пачки при деяких обмеженнях, що накладаються на один із керованих факторів, не вдаючись до громіздких розрахунків за рівняннями (4)–(6) для аеродинамічних захоплювачів швейних маніпуляторів.

Наведені номограми також можуть бути використані при проектуванні теоретичних циклограм роботи швейних машин з модулями автоматичного завантаження деталей крою з текстилю розміром до 300 x 150 мм. При цьому для дослідженого процесу цільову функцію $Y(p, l_c, l_c) \rightarrow \min$ потрібно погоджувати з часом виконання технологічних операцій сточування/обметування швейного виробу за необхідною довжиною та кривизною ниткового шва. Також отримані графічні номограми доцільно використовувати для інженерних розрахунків конструктивних параметрів та інших струменевих пневматичних пристроїв.

References

Література

1. Pyshchikov, V. O., Orlovsky, B. V. (2007). *Proektuvannia shveinykh mashyn* [Design of sewing machines]. Kyiv: Format. 320 p. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/4514> [in Ukrainian].
1. Пищиков В. О., Орловський Б. В. *Проектування швейних машин*. К.: Формат, 2007. 320 с. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/4514>.
2. Orlovsky, B. V., Abrinova, N. S. (2013). *Tekhnolohichne obladnannia haluzi (shveine vyrobnytstvo)* [Technological equipment of the industry (sewing industry)]. Kyiv: KNUTD. 285 p. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/4513> [in Ukrainian].
2. Орловський Б. В., Абрінова Н. С. *Технологічне обладнання галузі (швейне виробництво)*. К.: КНУТД, 2013. 285 с. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/4513>.
3. Patent Ukraina na vynakhid 126711 Shveina mashyna iz zakhvatom manipulatora detalei kroiu shveinykh vyrobiv [Patent of Ukraine for the invention No. 126711 Sewing machine with manipulator gripper for cutting parts of sewing products]. IPC (2022.01) B65H 3/00; B65H 1/04
3. Патент Україна на винахід 126711 Швейна машина із захватом маніпулятора деталей крою швейних виробів. МПК (2022.01), B65H 3/00, B65H 1/04 (2006.01), B65H 5/00, D06H 7/00. Б. В. Орловський, М. В. Місяць;

- (2006.01); B65H 5/00; D06H 7/00. B. V. Orlovskiy, M. V. Mysiats. Date of publication of information on state registration and Bulletin number: 11.01.2023, Byul. No. 2 [in Ukrainian].
4. Orlovsky, B. V., Misiats, M. V. (2022). Porivnialnyi analiz funktsionalno-adekvatnykh zakhvativ manipulatoriv zavantazhennia shveinykh mashyn detaliamy kroiu z tekstyliu [Comparative analysis of functionally adequate grips of manipulators for loading sewing machines with textile cut parts]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and engineering*, No. 2, P. 31–45. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.2.3> [in Ukrainian].
5. Misiats, M. V., Orlovskiy, B. V. (2024). Analitichna model i rozrakhunky aerodynamichnoho zakhopliuvacha detalei kroiu z tekstyliu zi stosu manipulatoriv zavantazhennia shveinykh mashyn [Analytical model and calculations of an aerodynamic grabber of cut textile parts from a pile of sewing machine loading manipulators]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky = Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Series: Technical sciences*, No. 1, P. 281–290. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-331-43 [in Ukrainian].
6. Montgomery, D. C. (2012). Design and analysis of experiments. Eighth edition. 725 p.
7. Burdick, R. K., Borrer, C. M., Montgomery, D. C. (2003). A Review of Methods for Measurement Systems Capability Analysis. *Journal of Quality Technology*, Vol. 35, No. 4, P. 342–354. DOI: 10.12913/22998624/165881.
8. Mason, R. L., Gunst, R. F., Hess, J. L. (2003). Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science. First published. John Wiley & Sons, Inc. DOI:10.1002/0471458503.
9. Krivoplias-Volodyna, L. O. (2019). [Multi-criteria synthesis of mechatronic functional modules of food packaging machines: dissertation. dr. technical of science 05.18.12]. Kyiv: NUHT. 457 p. [in Ukrainian].
10. Berger, P. D., Maurer, R. E. (2001). Experimental Design: With Applications in Management, Engineering, and the Sciences. 1st ed. Duxbury Press. 528 p.
11. Kume, H., Higuchi, K. Statistical Methods for Quality Improvement.
12. Hinkelmann, K., Kempthorne, O. Design and Analysis of Experiments. Vol. 1: Introduction to Experimental Design.
13. Brown, S. R., Tsai, L. H. Experimental Design and Analysis.
- володілець Київський національний університет технології та дизайну. № а 2020 07683; заявл. 03.12.2020; опублік. 11.01.2023, Бюл. № 2. 6 с.
4. Орловський Б. В., Місяць М. В. Порівняльний аналіз функціонально-адекватних захватів маніпуляторів завантаження швейних машин деталями крою з текстилю. *Технології та інжиніринг*. 2022. № 2. С. 31–45. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.2.3>.
5. Місяць М. В., Орловський Б. В. Аналітична модель і розрахунки аеродинамічного захоплювача деталей крою з текстилю зі стосу маніпуляторів завантаження швейних машин. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 1. С. 281–290. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-331-43.
6. Montgomery D. C. Design and analysis of experiments. Eighth edition. Wiley, 2012. 725 p.
7. Burdick R. K., Borrer C. M., Montgomery D. C. A Review of Methods for Measurement Systems Capability Analysis. *Journal of Quality Technology*. 2003. Vol. 35, No. 4. P. 342–354. DOI: 10.12913/22998624/165881.
8. Mason R. L., Gunst R. F., Hess J. L. Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science. First published. John Wiley & Sons, Inc., 2003. DOI:10.1002/0471458503.
- 9.Кривопляс-Володина Л. О. Багато-критеріальний синтез мехатронних функціональних модулів машин пакування харчових продуктів: дис. докт. техн. наук. 05.18.12. Київ: НУХТ, 2019. 457 с.
10. Berger P. D., Maurer R. E. Experimental Design: With Applications in Management, Engineering, and the Sciences. 1st ed. Duxbury Press, 2001. 528 p.
11. Kume H., Higuchi K. Statistical Methods for Quality Improvement.
12. Hinkelmann K., Kempthorne O. Design and Analysis of Experiments. Vol. 1: Introduction to Experimental Design.
13. Brown S. R., Tsai L. H. Experimental Design and Analysis.

14. Onyiah, L. C., Faraway, J. J. Design and Analysis of Experiments: Classical and Regression Approaches with SAS.
15. Kaplan, H. I., Lombard, A. J. Experimental Design and Analysis.
16. Lawson, J. Design and Analysis of Experiments with R.
17. Myers, R. H., Montgomery, D. C., Anderson-Cook, C. M. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments.
18. Nocedal, J., Wright, S. J. (1999). Numerical optimization (Springer series in operations research). Springer. 651 p.
19. Orlovskiy, B. V., Mysiat, M. V. (2023). Aerodynamichniy zakhvat manipuliatora detalei kroiu z tekstyliu [Aerodynamic grip of the manipulator of textile cut parts]. *XIII international scientific and practical conference "Complex quality assurance of technological processes and systems"*. Chernihiv Polytechnic National University, Vol. 1, P. 297–298. URL: <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/wp-content/uploads/2023/06/Tezy-2023-Part-1.pdf> [in Ukrainian].
20. Orlovskiy, B. V., Mysiat, M. V. (2022). Parametrychniy analiz i syntezy vyboru zakhvativ manipuliatoriv detalei kroiu z tekstyliu [Parametric analysis and synthesis of the selection of manipulators of textile cut details]. *XII international scientific and practical conference "Complex quality assurance of technological processes and systems"*. Chernihiv Polytechnic National University, Vol. 1, P. 209–212 [in Ukrainian].
21. Orlovskiy, B. V., Mysiat, M. V. (2022). Rozrobka eksperymentalnoi ustanovky dlia doslidzhennia zakhvatu manipuliatora detalei kroiu z tekstyliu [Development of an experimental setup for researching the grip of a manipulator of textile cut parts]. *Mechatronic systems: innovations and engineering: abstracts of reports of the VI international scientific and practical conference* (MSIE 2022, November 21, 2022). Kyiv: KNUITD. P. 33–34. [in Ukrainian].

MISIATS MICHAEL

Graduate student,
Department Mechanical Engineering,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0008-0354-5360>
E-mail: Mischalke@i.ua

14. Onyiah L. C., Faraway J. J. Design and Analysis of Experiments: Classical and Regression Approaches with SAS.
15. Kaplan H. I., Lombard A. J. Experimental Design and Analysis.
16. Lawson J. Design and Analysis of Experiments with R.
17. Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments.
18. Nocedal J., Wright S. J. Numerical optimization (Springer series in operations research). Springer, 1999. 651 p.
19. Орловський Б. В., Місяць М. В. Аеродинамічний захват маніпулятора деталей крою з текстилю. *XIII міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*. Чернігів: Національний університет «Чернігівська політехніка», 2023. Т. 1. С. 297–298. URL: <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/wp-content/uploads/2023/06/Tezy-2023-Part-1.pdf>.
20. Орловський Б. В., Місяць М. В. Параметричний аналіз і синтез вибору захватів маніпуляторів деталей крою з текстилю. *XII міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*. Чернігів: Національний університет «Чернігівська політехніка», 2022. Т. 1. С. 209–212.
21. Орловський Б. В., Місяць М. В. Розробка експериментальної установки для дослідження захвату маніпулятора деталей крою з текстилю. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції* (MSIE 2022, 21.11.2022). Київ: КНУІТД, 2022. С. 33–34.

ORLOVSKY BRONISLAV

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Mechanical Engineering,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7422-6000>
Scopus Author ID: 57190119942
E-mail: mlp-knutd@ukr.net

MISIATS M. V., ORLOVSKY B. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

PARAMETRIC SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE AERODYNAMIC GRIPPER OF CUT DETAILS FROM THE STACK OF TEXTILE FOR AUTOMATED SEWING MACHINES LOADING

Goal. Automation of loading sewing machines with cut parts on the basis of parametric synthesis in order to optimize the process of individual separation of cut parts from a pack by the aerodynamic grabber of a sewing manipulator and to determine the most rational combination of parameters that characterize the criterion for optimizing the basing of textile cut parts relative to their center of mass and one of the design parameters of the aerodynamic sewing manipulator gripper plates.

The methodology. In order to optimize the process of individual separation of cut textile parts from a bundle, the method of planning theory and analysis of a multi-factor experiment was applied for the proposed generalized indicator of the quality of constructed experimental-statistical models and to determine the extreme values of the parameters of the individual separation process using the aerodynamic method and the dyad device "sewing manipulator grabber – textile cut detail" with the most rational combination of significant parameters.

Result. To optimize the process of piece-by-piece separation of textile cut parts from a bundle with an aerodynamic gripper, an experimental setup was developed and a numerical experiment was performed. Graphical nomograms of two-dimensional cross-sections of the response surfaces of the target function for engineering calculations of design parameters and the work process of the aerodynamic gripper of the sewing manipulator for loading machines with cut parts from textiles of various groups of sewing products were constructed. Graphical interpretation and numerical calculations of the obtained formulas and mathematical models were performed to optimize the process of individual separation of textile cut parts from a pack using an aerodynamic method and a device for designing a mechanical-technological pair "sewing manipulator gripper - textile cut part" with the most rational combination of parameters that characterize the process of basing textile cut parts relative to their center of mass and one of the design parameters of the aerodynamic plate of the sewing manipulator gripper.

Scientific novelty: it consists in revealing the regularities of the optimization of the parameters of the aerodynamic grabber of textile cut parts from the stack for automated loading of sewing machines according to the results of the central rotatable composite plan of the 2nd order experiment (TsRKPE-2) at the adjusted zero levels of the controlled parameters $p = 1.5 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2}$ (Pa), $l_{\text{ш}} = 62,5$ mm, $l_c = 35,0$ mm and the realized 20x8 TsRKPE-2 matrix (20 series of experiments with 8 repetitions each). Statistical evaluations were carried out, which made it possible to obtain adequate 2nd-order mathematical models for the process of individual separation of textile cut parts from a stack for three optimization criteria Y_c , Y_k , Y_p – the duration of the cycle of individual separation from a stack of cut parts from shirt suit and coat group fabrics.

Practical significance: a method of parametric synthesis was developed to determine the optimal parameters of the aerodynamic grabber and the cycle of individual separation of textile cut parts from the pile based on theoretical justification and experimental research of the interaction of the working environment with the cut parts of the shirt, coat and suit group.

Keywords: parametric synthesis; optimization; grabber; sewing manipulator; statistical models; graphic nomograms; textile cut details.

УДК 677.055

PLESHKO S. A., KOVALOV Yu. A.
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

DEPENDENCE OF KNITTING MACHINE OPERATION DURABILITY ON NEEDLE DESIGN

Task. This research is focused on the accelerated durability testing of existing needles (item 0-388) of KO-type circular knitting machines and new needles suggested by the authors (Utility Model Patent of Ukraine No. 69369, 2012), and assessment of needle design effect on knitting machine operation durability.

Method. Up-to-date methods of theoretical and experimental research were applied when conducting this research and solving its tasks. When analyzing the needle design effect on operation durability, an up-to-date accelerated testing technique for knitting machine needle durability was applied using a previously installed unit.

Results. Operative parts of knitting mechanisms in a knitting machine are among the most critical elements that determine a knitting machine efficiency (machine productivity and quality of knitted fabric). The efficiency of knitting machines (productivity and quality of knitted fabric) largely depends on the faultless operation of critical parts in a knitting mechanism, particularly, the needles. When trying to increase the efficiency of knitting machines, special attention is paid to higher durability of needles as one of the pending problems in knitting machinery. The article considers analyzing the accelerated testing results of knitting machine needle durability: item 0-388 needles and a new design suggested by the authors, namely needles with grooves in the base and middle of the heel. The paper examines the influence of needle design on durability of its operation and confirms the feasibility of using new design needles in KO-type circular knitting machines instead of existing item 0-388 needles. The presence of grooves and an additional groove makes it possible to dampen the impact stress waves that arise in the body of the needle and to reduce their advance intensity from the heel to the hook and the latch holding unit. The analysis of research results led to the conclusions that the used technique and the accelerated testing unit for knitting machine needle durability make it possible to quickly and reliably assess the influence of the needle design on its operation durability.

Scientific novelty. Development of scientific basis and engineering methods to design knitting machines.

Practical relevance. The new needle design with grooves in the base and in the middle of the heel suggested by the authors (Utility Model Patent of Ukraine No. 69369, 2012) is functional and reliable in operation; the new needle design is almost 3.5 times more durable than that of existing item 0-388 needle.

Keywords: knitting machine; knitting machine needle; needle design; needle failure; accelerated needle durability tests.

Introduction. The efficiency of knitting machines (productivity and quality of knitted fabric) largely depends on the faultless operation of critical parts in a knitting mechanism, particularly, the needles [1...9].

One of the main drawbacks of knitting machines is significant dynamic loads in the zone of impact interaction between needles and wedges, which adversely affects their operation durability [4–7]. At the same time, their design features play a significant role in the durability of needles and wedges [1, 7]. Therefore, the issue of design influence assessment in a knitting machine operative parts on the durability of its operation is considered relevant and timely.

When trying to increase the efficiency of knitting machines, special attention is paid to higher durability of needles [4, 5] as one of the pending problems in knitting machinery.

Setting objectives. The object of research focused on accelerated testing of needle durability in a KO-type circular knitting machine and to evaluate the efficiency of new needles suggested by the authors. Up-to-date methods of theoretical and experimental research were applied when conducting research and solving the tasks set in this paper. The task of the research was accelerated

durability testing of existing needles (item 0-388) in KO-type circular knitting machines and needles of a new design [10], and assessment of needle design effect on durability of its operation.

Research results. When analyzing the needle design effect on operation durability, an up-to-date accelerated testing technique for knitting machine needle durability [2, 3] was applied using a previously installed unit, the scheme of which is featured in fig. 1 [2].

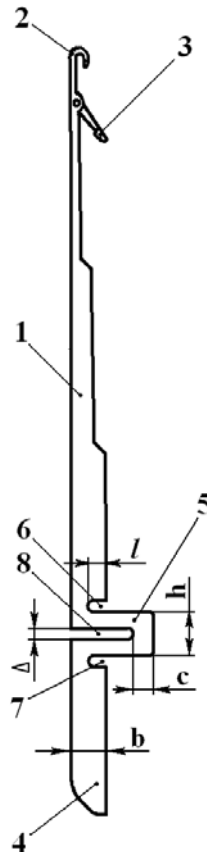


Fig. 1. Needle with grooves in the base and in the middle of the heel

The new needle suggested by the authors (the object of research to evaluate its operation efficiency in KO-type circular knitting machines instead of the existing needles, item 0-388) is featured in the figure.

The needle consists of rod 1 with hook 2 and tongue 3 at its one end, shank 4 with heel 5, the bases of which contain grooves 6 and 7, at its other end, and an additional rectangular-shaped groove 8 located in shank 4 coaxially with heel 5.

The operation principle of the needle is as follows. When the circular knitting machine is turned on, the needles installed in the needle cylinder of the knitting mechanism (not shown in Fig. 1) start to rotate. At the same time, heel 5, interacting with the wedges of the knitting mechanism (not shown in Fig. 1), ensures the reciprocating movement of the needle in the needle cylinder groove. Hook 2 and tongue 3 of rod 1, interacting with the yarn and loops of the knitted fabric, perform the process of looping, which is required to obtain the knitted fabric. The interaction of heel 5 with the wedges causes a shock pulse, which creates impact stress waves in the body of the needle. Grooves 6, 7 and additional groove 8 make it possible to extinguish the impact stress waves arising in the body of the needle, and to reduce their spread intensity from heel 5 to hook 2 and tongue unit 3. The dimensions of grooves 6, 7 and additional groove 8 may be selected if the uniform strength of the needle elements and their efficiency are maintained:

$$c = (0,5 \dots 0,7)h; \Delta = (0,15 \dots 0,2)h; l = (0,4 \dots 0,5)b, \quad (1)$$

where c is the distance of additional groove from the end of the heel;
 h is the heel width;
 Δ is the width of grooves and additional groove;
 l is the groove length;
 b is the shank width.

As already noted above, during the experiment, item 0-388 needles and new needles made from the same lot of item 0-388 needles. Unlike the well-known needles (item 0-388) used in KO-type circular knitting machines, the suggested needle additionally contains grooves at the base of the heel and a groove located in the middle of the heel on its back side. At the same time, considering the recommendations (1), the operation parameters of the new needle were applied: the depth of grooves at the base of heel is 1.8 mm; the depth of groove in the middle of the heel is 4.5 mm; the width of all grooves is 0.5 mm.

Conditions of the experiment:

- 28 item 0-388 needles and 28 needles with grooves of the specified parameters, made from the same batch of item 0-388 needles;
- in all experiments, the mode of unit operation for accelerated needle testing remained the same and was controlled by appropriate devices;
- the accepted probability of experiment results is $\alpha = 0,95$.

The obtained research results are shown in table. 1, 2.

Table 1

Results of accelerated durability tests of knitting machine needles (item 0-388 needles)

Durability of needles, T_{li}, c	Number of result repetitions, n_i	$n_i T_i$	Error of individual measurements, ΔT_{li}	$n_i (\Delta T_{li})^2$
32	1	32	7.28	52.99
33	3	99	6.28	118.32
35	2	70	4.28	36.63
36	3	108	3.28	32.27
38	2	76	1.28	3.27
39	3	117	0.28	0.23
40	2	80	-0.72	1.04
41	2	82	-1.72	5.91
42	3	126	-2.72	22.19
43	2	86	-3.72	27.67
44	3	132	-4.72	66.83
46	2	92	-6.72	90.32
	$n = 28$	$\Sigma 1100$		$\Sigma 457.67$

Processing of accelerated testing results for durability of item 0-388 needles (Table 1) was performed in accordance with the following method [11]:

– the average value of needle durability:

$$\bar{T}_1 = \frac{\sum n_i T_{li}}{n} = \frac{1100}{28} = 39,28 c; \quad (2)$$

– the mean squared error of measurement results:

$$\Delta S_1 = \sqrt{\frac{\sum n_i (\Delta T_{1i})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{457,67}{28(28-1)}} = 0,78 \text{ c}; \quad (3)$$

– limits of the confidence interval:

$$\Delta T_1 = \sqrt{(t_\alpha \Delta S_1)^2 + \left(\frac{K_\alpha}{3} \gamma\right)^2} = \sqrt{(2,09 \cdot 0,78)^2 + \left(\frac{1,96}{3} \cdot 0,785\right)^2} = 1,71 \text{ c}, \quad (4)$$

where t_α is Student's coefficient; at $\alpha = 0,95$ $t_\alpha = 2,09$ [8];

$$K_\alpha \equiv t_\alpha(n \rightarrow \infty) = 1,96 \text{ [8];}$$

γ is the error of measuring device,

$$\gamma = \frac{\beta \bar{T}_1}{100\%} = \frac{2 \cdot 39,28}{100} = 0,785 \text{ c}; \quad (5)$$

$$\beta = 2\% \text{ [3];}$$

– relative error of a series of measurements:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta T_1}{\bar{T}_1} \cdot 100\% = \frac{1,71}{39,28} \cdot 100\% = 4,35\%. \quad (6)$$

The final result for accelerated testing of item 0-388 needle durability is as follows:

$$T_1 = \bar{T} \pm \Delta T_1 = (39,28 \pm 1,71) \text{ c}. \quad (7)$$

Table 2

**Results of accelerated durability tests of knitting machine needles
 (new needles; Utility Model Patent of Ukraine No. 69369, 2012)**

Durability of needles $T_{2i}, \text{ c}$	Number of result repetitions n_i	$n_i T_{2i}$ $N_i T_{2i}$	Error of individual measurements ΔT_{2i}	$n_i (\Delta T_{2i})^2$
121	1	121	15.18	230.43
123	2	246	13.18	347.42
125	2	250	11.18	249.98
127	2	254	9.18	168.54
130	2	260	6.18	76.38
133	3	399	3.18	30.34
135	1	135	1.18	1.39
137	2	274	-0.82	1.34
140	3	420	-3.82	43.78
141	2	282	-4.82	46.46
143	2	286	-6.82	93.02
146	3	438	-9.82	289.29
148	1	148	-11.82	139.71
150	2	300	-13.82	381.98
	$n = 28$	$\Sigma 3813$		$\Sigma 2100.06$

The processing of experiment results is performed similarly using dependencies (2)...(7):

$$\bar{T}_2 = 136,18 \text{ c}; \Delta S_2 = 2,77 \text{ c}; \Delta T_2 = 6,05 \text{ c}; \gamma = 2,723 \text{ c}; \varepsilon_2 = 4,44\% .$$

Then the final result of accelerated durability testing of new knitting machine needles is as follows:

$$T_2 = (136,18 \pm 6,05) \text{ c}.$$

The coefficient of efficiency (increased durability) of new needles in comparison with the existing needles used for KO-type circular knitting machines is as follows:

$$n = \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} = \frac{136,18}{39,28} = 3,47 . \quad (8)$$

Conclusions. Analyzing the research results, the following conclusions can be made:

- the used methodology and unit for conducting accelerated tests of knitting machine needle durability make it possible to quickly and reliably assess the influence of needle design on its operation durability;
- the new design of needle with grooves in the base and in the middle of the heel suggested by the authors (Utility Model Patent of Ukraine No. 69369, 2012) is functional and reliable in operation;
- the new design of needle is almost 3.5 times more durable than the existing designs of the needles of pos. 0-388.

References

Література

1. Moiseienko, F. A. (1994). *Proektuvannia viazalnykh mashyn* [Design of connecting machines]. Kharkiv: Osnova. 336 p. [in Ukrainian].
2. Voloshchenko, 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].
3. Pipa, B. F., Voloshchenko, V. P., Shypukov, S. T., Orlov, V. A. (1983). *Pidvyshchennia nadiinosti trykotazhnoho obladnannia* [Raising Hope Knitted Equipment]. Kyiv: Tekhnika. 112 p. [in Ukrainian].
4. Pipa, B. F. (2008). *Dynamika mekhanizmiv viazannia kruhloviazalnykh mashyn* [Dynamics of knitting mechanisms of bread machines]. Kyiv: KNUVD. 416 p. [in Ukrainian].
6. Karmalita, A. K., Marchenko, A. I. (2012). *Vplyv konstruktsii holky viazalnoi mashyny na znyzhennia dynamichnykh navantazhen u mekhanizmi viazannia* [The influence of the design of the knitting machine needle on the reduction of dynamic loads in knitting mechanisms]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, № 6, P. 53–57 [in Ukrainian].
7. Pleshko, S. A., Kovalov, Yu. A. (2016). *Vplyv konstruktsii robochykh orhaniv viazalnoi mashyny na dovhovichnist yikh roboty* [The influence of designs of the working bodies of the knitting machine on the durability of
1. Мойсеєнко Ф. А. *Проектування зв'язкових машин*. Харків: Основа, 1994. 336 с.
2. Волощенко В. П., Піпа Б. Ф., Шипуков С. Т. *Експлуатаційна надійність машин трикотажного виробництва*. Київ: Техніка, 1977. 136 с.
3. Піпа Б. Ф., Волощенко В. П., Шипуков С. Т., Орлов В. А. *Підвищення надії трикотажного обладнання*. Київ: Техніка, 1983. 112 с.
4. Піпа Б. Ф. *Динаміка механізмів в'язання хлібопровідних машин*. Київ: КНУТД, 2008. 416 с.
6. Кармаліта А. К., Марченко А. І. *Вплив конструкції голки в'язальної машини на зниження динамічних навантажень у механізмах в'язання*. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2012. № 6. С. 53–57.
7. Плешко С. А., Ковальов Ю. А. *Вплив конструкцій робочих органів в'язальної машини на довговічність їх роботи*. *Легка промисловість*. 2016. № 1. С. 29–31.

their work]. *Lehka promyslovist = Light industry*, № 1, P. 29–31 [in Ukrainian].

8. Pleshko, S. A., Kovalov, Yu. A., Rubanka, M. M. (2022). *Pidvyshchennia efektyvnosti roboty v'iazalnykh mashyn: monohrafiia* [Increasing the efficiency of joint machines: monograph]. Kyiv: KNUTD. 288 p. [in Ukrainian].

9. Krassii, H. H. et al. (1975). *Dovidnyk trykotazhnyka* [The Knitter's Handbook]. Kyiv: Tekhnika. 320 p. [in Ukrainian].

10. Patent UA 69369 *Holka v'iazalnoi mashyny* [Knitting machine needle]: МПК D04B 15/04 (2006.01). № 2011 12334; zaiv. 21.10.2011; opubl. 25.04.2012, Biul. № 8. 4 p. [in Ukrainian].

11. Kassandrova, O. N., Lebediev, V. V. (1970). *Obrobka rezultativ sposterezhen* [Processing of observation results]. 104 p. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/34780>.

8. Плешко С. А., Ковальов Ю. А., Рубанка М. М. Підвищення ефективності роботи зв'язкових машин: монографія. Київ: КНУТД, 2022. 288 с.

9. Красій Г. Г. та ін. Довідник трикотажника. Київ: Техніка, 1975. 320 с.

10. Патент Україна 69369. Голка в'язальної машини. МПК D04B 15/04 (2006.01). № 2011 12334; заяв. 21.10.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. 4 с.

11. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М., 1970. 104 с. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/34780>.

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-s-a@ukr.net*

KOVALOV YURIY

*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

**ЗАЛЕЖНІСТЬ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ В'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ
ВІД КОНСТРУКЦІЇ ГОЛКИ**

Мета. Завданням досліджень стали прискорені випробування довговічності роботи існуючих голок (поз. 0-388) круглов'язальних машин типу КО і нових, запропонованих авторами, голок (Пат. України на корисну модель № 69369, 2012 р.) та оцінка впливу конструкції голки на довговічність її роботи.

Методика. При проведенні досліджень та вирішенні завдань, поставлених у даній роботі, були використані сучасні методи теоретичних і експериментальних досліджень. При проведенні досліджень впливу конструкції голки на довговічність її роботи були використані сучасна методика прискорених випробувань довговічності роботи голок в'язальних машин та раніше розроблена установка.

Результати. Робочі органи механізмів в'язання в'язальних машин відносяться до найбільш відповідальних елементів, що зумовлюють ефективність роботи в'язальних машин (продуктивність машин та якість трикотажного полотна). Ефективність роботи в'язальних машин (продуктивність та якість трикотажного полотна) в значній мірі залежить від досконалості робочих органів механізму в'язання, зокрема голок. При вирішенні питань підвищення ефективності роботи в'язальних машин особлива увага приділяється підвищенню довговічності роботи голок, що є однією із актуальних проблем трикотажного машинобудування. Стаття присвячена розгляду та аналізу результатів прискорених випробувань довговічності роботи голок в'язальних машин: голки поз. 0-388 та нової конструкції, яка запропонована авторами, а саме голки з пазами у основи та посередині п'ятки. В роботі досліджено вплив конструкції голки на довговічність її роботи та підтверджена доцільність використання голок нової конструкції в круглов'язальних машинах типу КО замість існуючих голок поз. 0-388. Наявність пазів та додаткового пазу дозволяє погасити ударні хвилі

напружень, що виникають при цьому в тілі голки, і зменшити інтенсивність їх розповсюдження від п'ятки до крючка і вузла кріплення язичка. Аналіз результатів досліджень привів до висновків, що використані методика та установка для проведення прискорених випробувань довговічності роботи голок в'язальних машин дають можливість оперативно та достовірно оцінити вплив конструкції голки на довговічність її роботи.

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

Практична значимість. Запропонована авторами нова конструкція голки з пазами у основи та посередині п'ятки (Пат. України на корисну модель № 69369, 2012 р.) працездатна та надійна в роботі; а нова конструкція голки майже у 3,5 рази більш довговічніша, ніж існуючі конструкції голок поз. 0-388.

Ключові слова: в'язальна машина; голка в'язальної машини; конструкція голки; відмова голки; прискорені випробування довговічності роботи голок.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.6>

УДК 004.932.2

ПОСВІСТАК В. С., МІРОШНИЧЕНКО Д. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ВБУДОВАНИХ АЛГОРИТМІВ ВІДСТЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ OPENCV ПРИ ОБРОБЦІ КАДРІВ ІЗ БПЛА

Мета. Дослідження та порівняння ефективності алгоритмів відстеження об'єктів OpenCV при обробці кадрів із типовими проблемами зображень, зроблених з камер дронів. Проведення експериментів для визначення переваг та недоліків, тенденцій до збоїв, проблем із швидкодією.

Методика. Для експериментів записані відео у симуляторі польотів на дроні для семи типових проблемних ситуацій. Коректну поведінку (фундаментальну істину) визначено шляхом ручного задання обмежувальної рамки для кожного кадру з допомогою Python-скрипту. Визначено типові проблемні ситуації: зміна кута камери, зміна позиції об'єкта на кадрі, наявність ідентичних об'єктів, рух об'єкта, спотворення зображення, поява перепони перед об'єктом, зміна масштабування об'єкта. Розроблено та застосовано Python-скрипти для автоматизації вимірювання чотирьох критеріїв ефективності роботи алгоритмів: індекс співпадіння обмежувальних рамок, відстань між центрами рамок, показник успішності, витрата часу на кожний кадр.

Результати. Досліджено ефективність роботи алгоритмів Boosting, CSRT, KCF, MedianFlow, MIL, MOSSE, TLD при обробці кадрів із проблемними ситуаціями, типовими для зображень із дронів. Проведено аналіз схильності до збоїв, подібностей роботи різних алгоритмів, проблем із швидкодією. Результати експериментів представлені у вигляді таблиці чисел, графіків та візуалізації роботи кожного алгоритму.

Наукова новизна. За результатами дослідження визначено тенденції алгоритмів до некоректної роботи при обробці кадрів, що містять проблеми, типові для зображень, зроблених із камери дрона.

Практична значимість. Результати можуть бути використані для пріоритетизації використання або комбінування окремих алгоритмів залежно від сфери застосування.

Ключові слова: відстеження об'єктів; визначення об'єктів; дроніві технології; обробка зображень; OpenCV.

Вступ. Відстеження об'єктів є однією із фундаментальних задач комп'ютерного зору, стоячи поруч із виявленням та визначенням об'єктів. Алгоритми відстеження об'єктів широко застосовуються у повсякденних задачах: контроль дотримання правил дорожнього руху, спортивна аналітика, доповнена реальність, відстеження пожеж тощо. Задачі відстеження об'єктів досліджуються вже десятки років, багато алгоритмів було створено достатньо давно, та виникають нові, більш досконалі алгоритми, проте поточний стан розвитку даної сфери далекий від ідеального.

Існують різні фактори, що можуть негативно впливати на ефективність алгоритмів, такі як погане освітлення, нестабільний фон, розмите зображення тощо [1]. Створення універсального алгоритму, який би працював однаково ефективно у різних умовах є майже неможливою задачею [2, 3].

Із розвитком дронівих технологій алгоритми відстеження об'єктів набувають неабиякої актуальності, оскільки можуть застосовуватись у широкому спектрі задач – від простого підсвічування об'єктів на кадрі до комплексних програмних систем для автономного керування дроном. Через специфіку сфери застосування присутній набір викликів, що ускладнюють обробку зображень. Залежно від конкретного обладнання, може варіюватись якість зображення, присутність чи відсутність стабілізації відеозйомки.

Камери можуть бути чутливими до поганого освітлення, їх розмір обмежений, а передача даних здійснюється за допомогою радіозв'язку, що схильний до впливу зовнішніх

факторів на якість зображення (радіо- та фізичні перешкоди, погана погода тощо) [4]. Залежно від сфери застосування може бути присутня тенденція до оптимізації та зниження витрат, що також впливає на якість камери, радіопередавача, контролера, а в результаті і кінцевих зображень.

OpenCV – бібліотека з відкритим кодом, що містить у собі набір функцій та алгоритмів для комп'ютерного зору, обробки зображень та застосування машинного навчання. Вона широко використовується у робототехніці для задач із аналізом, обробкою зображень, відеоаналітикою, доповненою реальністю та для досліджень у галузі комп'ютерного зору. Про популярність даної бібліотеки свідчить понад 47 тисяч користувачів та приблизно 18 мільйонів скачувань [5]. OpenCV підтримує широкий спектр мов програмування, серед яких є C++, Python, Java тощо, а також містить у собі інструменти для використання переваг апаратного прискорення та багатоядерних систем.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є проведення експериментів із алгоритмами відстеження об'єктів OpenCV при обробці кадрів із типовими проблемами зображень, зроблених з камер дронів (див. табл. 1), а також визначення тенденцій до збоїв, проблем із швидкодією та подібностей різних алгоритмів.

Таблиця 1

Проблемні ситуації

Абревіатура	Проблема	Опис
ANGL_CH	зміна кута камери	Під час польоту кут огляду камери відносно об'єкта може змінюватися, що призводить до зміни перспективи на зображенні
FST_MOT	стрімка зміна позиції об'єкта на кадрі	Об'єкти на зображенні можуть швидко змінювати своє положення через швидкість руху дрона або об'єкта, різкої зміни напрямлення польоту тощо
ID_OBJ	наявність ідентичних об'єктів	У випадку наявності декількох ідентичних об'єктів у кадрі можуть виникати проблеми у розрізненні між ними
MOV_OBJ	рух об'єкта	При русі об'єкта може змінюватись кут огляду, позиція на зображенні, його масштабування тощо
NOISE	спотворення зображення	Нестабільний радіосигнал або радіоперешкоди можуть призводити до спотворення зображень та появи білого шуму, що ускладнює розпізнавання відстежуваних об'єктів, особливо у комбінації із камерою невисокої якості
OBST	поява перепони перед об'єктом	Під час польоту можуть з'являтися перешкоди перед об'єктом, що призводять до часткового або повного закриття об'єкта на зображенні
SCALE	зміна масштабування об'єкта	Розмір об'єктів може змінюватись при стрімкому наближенні чи віддаленні дрона, що ускладнює їх розпізнавання

Результати дослідження будуть корисні при виборі алгоритмів до використання та їх комбінація, залежно від потенційних проблемних ситуацій. Очікується, що визначення переваг та недоліків алгоритмів допоможе оптимізувати витрату часу на обробку зображень у реальному часі та підвищити точність відстеження об'єктів. Це відкриє можливості для розробки більш стабільних систем, здатних адаптуватися до динамічних змін у зовнішньому середовищі.

Досліджені проблемні ситуації. Зображення з камер дронів можуть містити типові проблемні ситуації через особливості умов зйомки та характеристики подібних систем, що

можуть ускладнювати відстеження об'єктів. Було визначено поширені проблемні ситуації, кожній із яких було присвоєно відповідну аббревіатуру, яка буде використовуватись в подальшому у цій роботі (див. табл. 1).

Відеозаписи із проблемними ситуаціями було зроблено у симуляторі FPV-дронів “Uncrashed” [6] і збережено у вигляді коротких відеофайлів (від 1,4 до 3 секунд) із частотою кадрів 30 на секунду. Даний симулятор містить різні карти, де можна відтворювати польоти на дроні у вільному режимі. Під час запису можуть бути присутні інші об'єкти на задньому фоні, включаючи рухомі, такі умови найбільш наближені до реальних. Було визначено окремі критерії для оцінки ефективності алгоритмів та для їх подальшого порівняння: індекс співпадіння істинної та фактичної обмежувальної рамки, відстань між центрами рамок, витрата часу на кадр, а також показник успішності. Проведено порівняння роботи алгоритмів в однакових умовах та продемонстровано їх тенденції до некоректної поведінки у проблемних ситуаціях.

Методи дослідження. Як було зазначено в аналогічних роботах, проведення експериментів із ефективністю алгоритмів відстеження об'єктів може бути досить складним завданням через різні фактори, такі як освітлення, зміна куту, нестабільність камери, спотворення та розмиття зображення тощо [3]. Вибір правильної метрики оцінювання та експериментальних даних необхідний для забезпечення того, щоб жодна важлива інформація про алгоритм не була втрачена. У випадку відстеження об'єктів критеріями якісної роботи алгоритму є точність обмежувальної рамки, показник успішності та швидкодія.

Досліджено алгоритми CSRT [7], KCF [8–10], MIL [11], Boosting [12], MedianFlow [13], MOSSE [14], TLD [15]. Експерименти були проведені з opencv-contrib-python 4.9.0.80 із Python інтерпретатором версії 3.11, на ОС Ubuntu 23.04 із версією ядра Linux 6.2.0-39-generic. Апаратні характеристики: AMD Ryzen 5 5600X, AMD Radeon RX 6700 XT, 32 GB RAM.

Визначення фундаментальної істини (ground truth). Для правильного вимірювання коректності роботи алгоритмів у проблемних ситуаціях основним викликом є наявність фундаментальної істини (ground truth). У даному дослідженні визначення коректних рамок відбувалось за допомогою скрипту для ручного визначення коректної обмежувальної рамки (або її відсутності) для об'єкта у кожному кадрі відео. Під час ручного задання прямокутника була можливість автоматично перевикористати рамку із попереднього кадру, яка завжди була відображена на поточному кадрі, таким чином мінімізуючи похибку через ручне введення (див. рис. 1). Задання прямокутника відбувалось якомога ближче до фізичних контурів об'єкта, у такий спосіб прямокутник доволі точно відображає позицію об'єкта, проте можливі незначні похибки. Дані зберігались у локальний файл у вигляді списку елементів формату (x1, y1, w, h), де (x1, y1) – координати початку рамки (ліворуч зверху), а (w, h) це її довжина та ширина. Загалом таким чином було оброблено 591 кадр. В подальшому істинна рамка буде зображена у вигляді зеленого прямокутника, а рамка, розрахована алгоритмами – у вигляді синього.

Точність обмежувальної рамки. Для вимірювання точності обмежувальної рамки проведено 2 окремих види експериментів, де були визначені показники BBMR (bounding box match ratio) – індекс перетину рамок, та CTCD – відстань між центрами рамок у пікселях.

Bounding box match ratio. Для визначення BBMR за основу було використано формулу коефіцієнта Жаккара – область (кількість пікселів) перетину рамок, поділена на область їх об'єднання:

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|},$$

де A та B – прогнозована та очікувана обмежувальні рамки [16]. Для ініціалізації кожного алгоритму використовувався перший кадр із збереженого списку ground truth. У

випадках появи перепони перед об'єктом чи втрати об'єкта із кадру (див. рис. 2), використання оригінальної формули Жаккара не є можливим при відсутності обох рамок. В цьому випадку і перетин і об'єднання дорівнюють 0, але відсутність обох рамок є коректним результатом. Індекс BBMR враховує ситуацію, коли обидві рамки порожні, та у цьому випадку дорівнює 1 – див. рис. 3.

```
ground_truth_box = cv.selectROI(frame, showCrosshair=False)
if ground_truth_box == (0, 0, 0, 0):
    print(f"{TextColor.GREEN}No bounding box was selected. \n"
          f"Press <y> to confirm that it's expected to have no bounding box\n"
          f"Press <r> to re-use the previous bounding box\n"
          f"Press any other key to re-select the bounding box{TextColor.RESET}")
    key = cv.waitKey(0)
    if key == ord('y'):
        prev_bbox = ground_truth_box
        break
    elif key == ord('r'):
        ground_truth_box = prev_bbox
        break
else:
    prev_bbox = ground_truth_box
    break
```

Рис. 1. Ручне введення обмежувальної рамки з допомогою функції selectROI у OpenCV



Рис. 2. Присутність та відсутність рамки, залежно від перепони (експеримент OBST)

```
def bbox_match_ratio(bbox_a, bbox_b):
    if is_empty(bbox_a) or is_empty(bbox_b):
        if is_empty(bbox_a) and is_empty(bbox_b):
            return 1
        return 0

    return intersection_area(bbox_a, bbox_b) / union_area(bbox_a, bbox_b)
```

Рис. 3. Визначення значення індексу співпадіння рамок (BBMR)

Center to center distance. Оскільки у випадку відсутності їх перетину, коефіцієнт Жаккара однаково дорівнює 0, незалежно від того, як далеко поточна рамка знаходиться від очікуваної, необхідно ввести в експеримент ще один критерій. СТCD – дистанція між центрами обмежувальних рамок у пікселях (зображено на кадрі у вигляді червоної лінії – див. рис. 4).

Також можлива ситуація, коли центр рамки співпадає з очікуваним, але сама рамка має більший або менший за очікуваний розмір, зрівнюючи показник ефективності зміщеної та

збільшеної рамки (див. рис. 5). Завдяки вимірюванню CCTD жодна важлива інформація про експеримент не буде втрачена, про необхідність чого було зазначено вище.

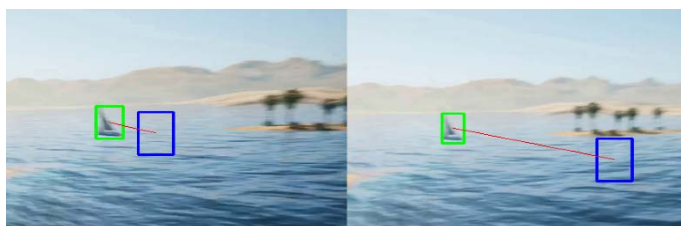


Рис. 4. Демонстрація необхідності визначення відстані між центрами рамок, у обох випадках $VBMR = 0$ (експеримент FST_MOT – алгоритм MIL)



Рис. 5. Демонстрація необхідності визначення відстані між центрами рамок, приблизно однаковий $VBMR$ (експеримент MOV_OJ)

Виняткова ситуація – відсутність однієї із обмежувальних рамок, у цьому випадку індекс СТCD буде розрахований як максимально можлива дистанції – між точками $(x=0, y=0)$ та $(x=<ширина\ кадру>, y=<висота\ кадру>)$, тобто по діагоналі кадру. У випадку відсутності обох рамок дистанція буде дорівнювати 0, оскільки це очікуваний результат (а чим менша дистанція, тим вища коректність знайденої рамки).

Показник успішності. Для визначення показника успішності можливо використовувати вже розрахований $VBMR$. Для кожного кадру успішне визначення є таким, де $VBMR > 0.5$ [3]. Також для окремих проблемних випадків буде врахований показник $VBMR > 0.25$.

Швидкодія. Швидкодія алгоритмів при обробці кожного кадру була розрахована за допомогою бібліотеки `timeit` [17]. Її використання дозволяє уникнути поширених помилок із використанням немонотонних системних годинників, має зручний інтерфейс для вимірювання ізольованої частини коду та конфігурування кількості ітерацій вимірювання для уникнення похибки. У даному експерименті було використано 100 ітерацій (див. рис. 6).

```
# number_of_runs == 100 by default
time = timeit.timeit(lambda: tracker.update(processed_frame), number=number_of_runs)
time_in_ms = (time * 1000) / number_of_runs
```

Рис. 6. Розрахунок витрати часу на кожний кадр

Результати досліджень. Витрата часу та $VBMR$ разом із СТCD були розраховані окремими `python`-скриптами по чергово для кожного алгоритму, який зберігав всі дані для експорту локально. Для візуалізації результатів використовувалися графічні інструменти `Statistics Kingdom` [18, 19]. Із усіма результатами, набором експериментальних зразків, візуалізацією та скриптами розрахунку можна ознайомитись у `GitHub` репозиторії даної роботи [20].

Зміна кута камери. Експеримент проводився із облітанням автомобіля по колу на 90 градусів. Усі алгоритми впоралися із утриманням рамки на об'єкті, окрім KCF, який ближче до кінця відео втратив фокус (див. рис. 7). При зміні кута на фронтальний відносно автомобіля, прогнозована рамка зберігала свою минулу форму у вигляді горизонтального прямокутника, таким чином зменшуючи коефіцієнт Жаккара ближче до кінця відео.

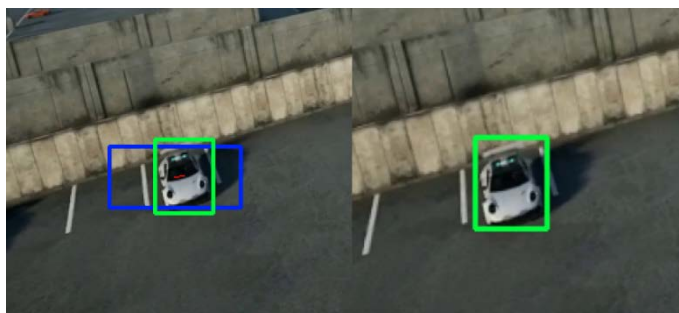


Рис. 7. Втрата фокусу алгоритмом KCF ближче до кінця відео, демонстрація збереження форми прямокутника (ліворуч)

MOSSE, MedianFlow – лідери за швидкодією, проте присутня тенденція прив'язки до обраної області, не дивлячись на те що при обертанні навколо об'єкта його позиція на кадрі змінюється (див. рис. 8). У випадку MedianFlow також зменшується прогнозована рамка. Це візуалізується гіршими STCD результатами для даних алгоритмів (див. рис. 10).



Рис. 8. Прив'язка MOSSE до пікселів на фоні (аналогічно із MOSSE)

TLD мав тенденцію «стрибків» прямокутника під час обертання, проте фокусувався на об'єкті. Boosting, CSRT, KCF, MIL точно відстежували об'єкт, центруючи його у початковій формі – див. рис. 9.



Рис. 9. Центрування об'єкта алгоритмом CSRT (аналогічно із Boosting, KCF, MIL)

Стрімка зміна позиції об'єкта на кадрі. TLD найкраще впорався із фокусом на об'єкті, що різко змінює своє положення на кадрі, і майже весь час був сфокусований на правильній позиції. У MedianFlow були тенденції до фокусування на початку відео (коли швидкість не була такою стрімкою), але при подальшому русі та розмитті кадру він втрачав фокус. Інші алгоритми прив'язувались до фіксованої позиції на кадрі і рухались разом із центром камери дрона при повороті, або втрачали фокус – див. рис. 11.

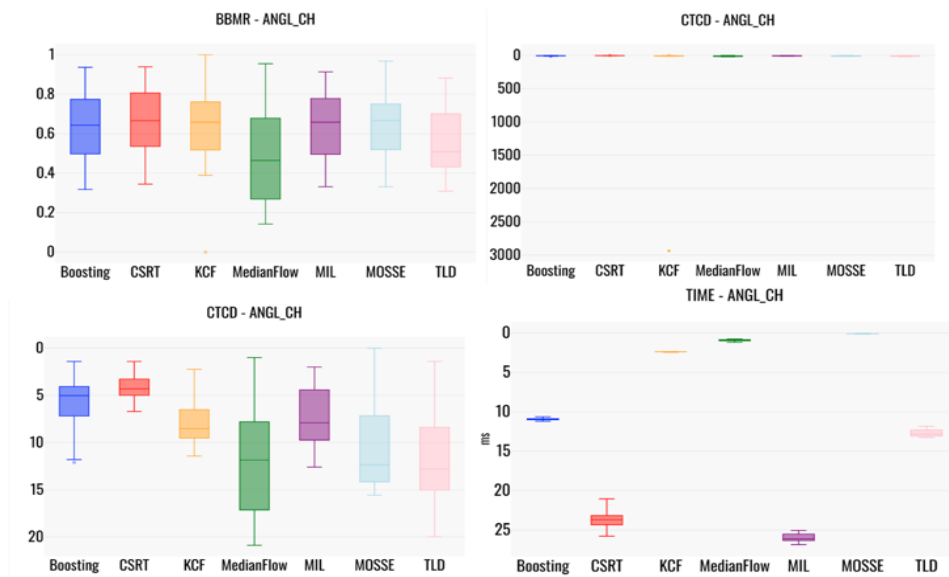


Рис. 10. Показники ефективності алгоритмів при обробці кадрів із зміною кута камери (BBMR, CTCD, час обробки кадру)



Рис. 11. Втрата фокусу при стрімкому повороті камери

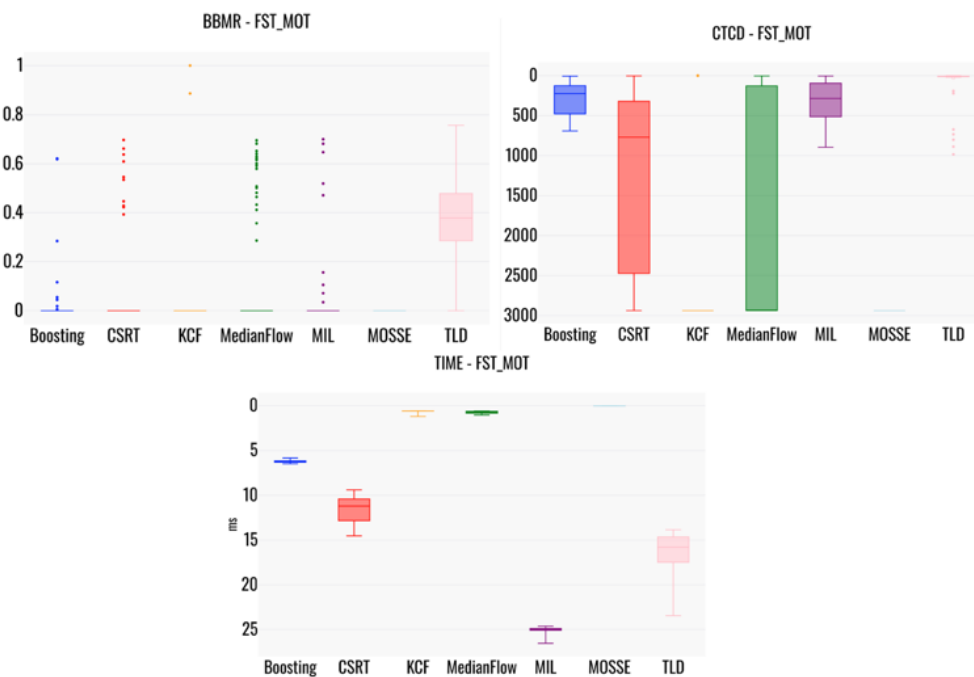


Рис. 12. Показники ефективності алгоритмів при обробці кадрів із стрімкою зміною позиції об'єкта на кадрі (BBMR, CTCD, час обробки кадру)

Наявність ідентичних об'єктів. Boosting, CSRT, KCF, MedianFlow відмінно тримали очікувану позицію, незважаючи на ідентичні об'єкти поряд (див. рис. 13). В середньому лідерами швидкодії були KCF (0.5 мс/кадр), MedianFlow (0.9 мс/кадр) та Boosting (4.4 мс/кадр). CSRT в середньому витрачав 23.3 мс/кадр.



Рис. 13. Вдале фокусування алгоритмів Boosting, CSRT, KCF, MedianFlow

MIL, TLD мали тенденцію фокусуватись на об'єктах, ідентичних до очікуваного, MIL тільки вертикалі, а TLD у випадковому режимі – див. рис. 14.



Рис. 14. Фокусування на ідентичних об'єктах, MIL (ліворуч) та TLD (праворуч)

MOSSE був поза кадром майже весь час, створивши лише один прямокутник із $BBMR=0.07$.

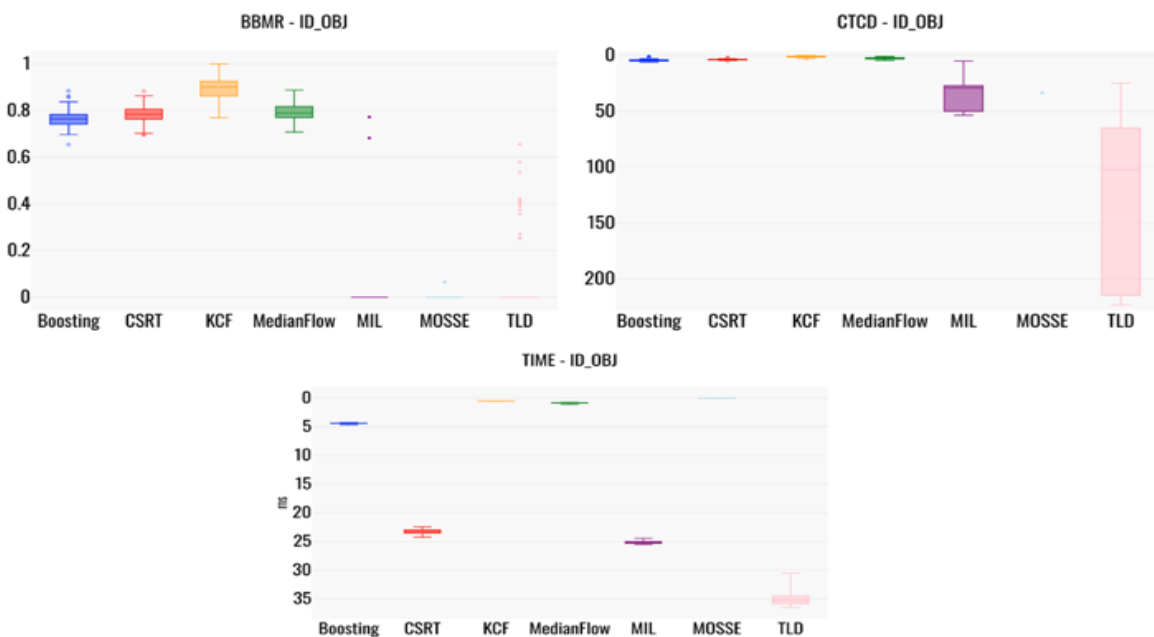


Рис. 15. Показники ефективності алгоритмів при обробці кадрів із наявністю ідентичних об'єктів (BBMR, CTCD, час обробки кадру)

Об'єкт, що рухається. Відео для цього експерименту (камера, що переслідує авто, що рухається) є певною комбінацією незначної зміни кута камери, розміру об'єкта та зміни його позиції. Авто добре виділяється на фоні дороги. Алгоритми показали високу ефективність у фокусуванні на очікуваному об'єкті. Boosting, CSRT, KCF, MOSSE зберігали більший розмір прямокутника по мірі віддалення авто, але точно центрували об'єкт – див. рис. 16.



Рис. 16. Поведінка Boosting алгоритму (схожа на CSRT, KCF, MOSSE)

MedianFlow правильно адаптував розмір рамки, але було зміщення догори (див. рис. 17). Загалом проявив себе найкраще із показником успішності 100%, для всіх кадрів BBMR був вищий за 0.5 (див. табл. 2).



Рис. 17. Зміщення догори (MedianFlow)

Для MIL та TLD були характерні незначні горизонтально-вертикальні зміщення, проте TLD виявився точнішим за рахунок того, що адаптував розмір рамки по мірі зменшення об'єкта – див. рис. 18.



Рис. 18. Зміщення рамки та адаптація розміру (MIL ліворуч, TLD праворуч)

CSRT показав найгірші результати у витраті часу. Після середини вимірювання (~40й кадр, враховуючи 100 ітерацій вимірювання витрати часу для кожного з них) витрата часу зросла більше ніж вдвічі, ближче до кінця відео також було стрімке зростання до пікових

182 мс/кадр (див. рис. 19). Експеримент був повторений декілька разів, викликаючи подібну поведінку. Достеменна причина невідома, але на це може впливати конкретна реалізація алгоритму у бібліотеці OpenCV.

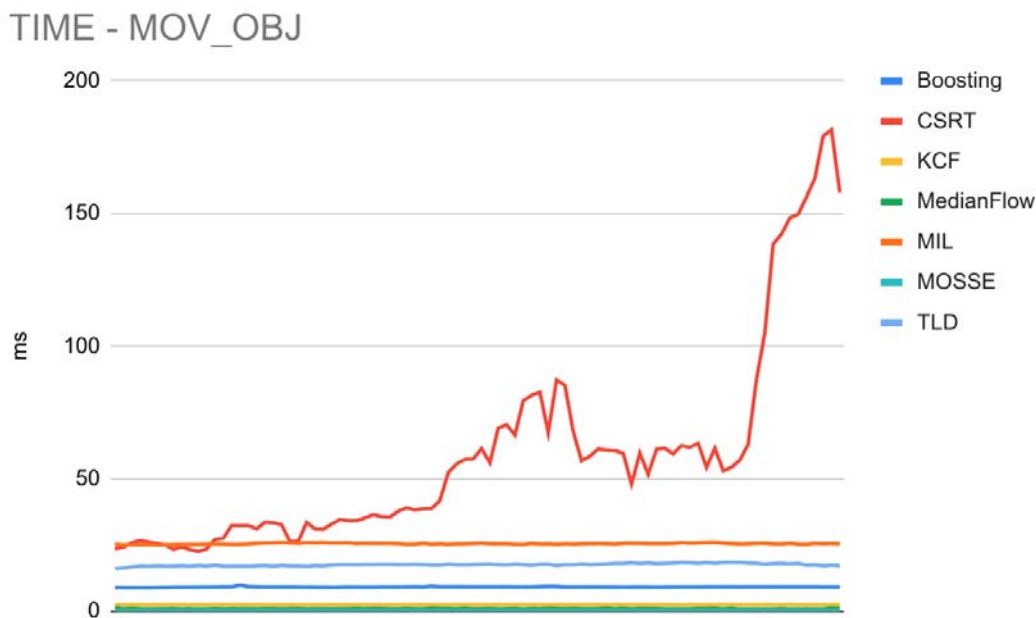


Рис. 19. Витрата часу CSRT впродовж відео (кожен кадр вимірювався 100 разів)

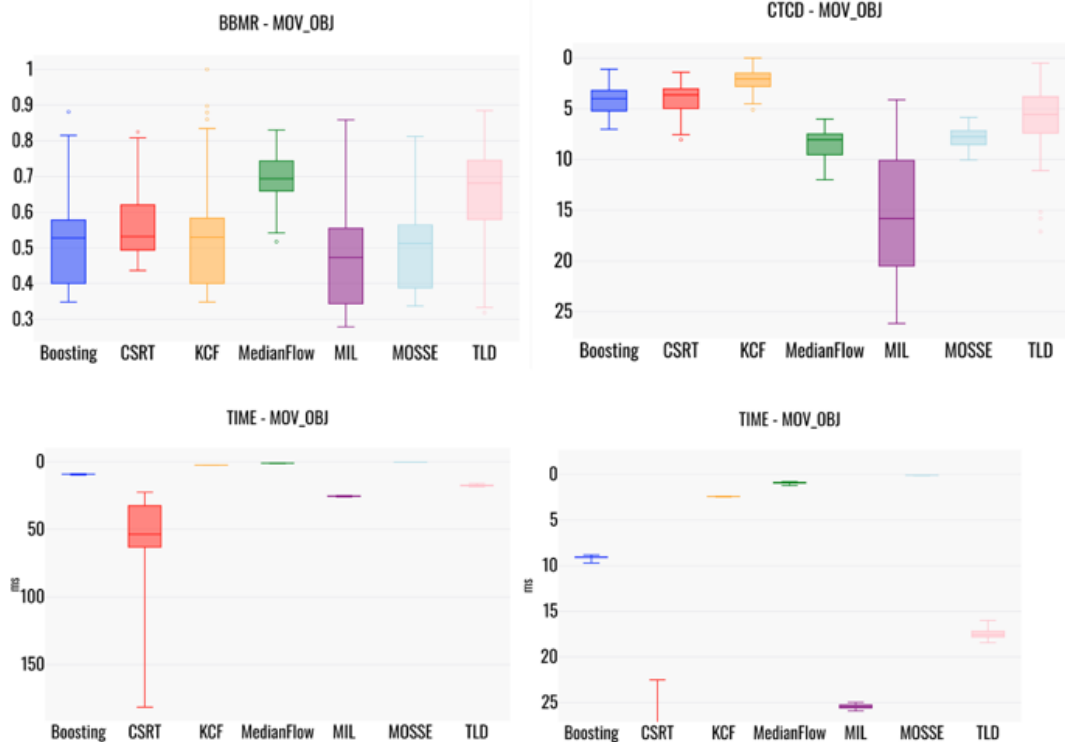


Рис. 20. Показники ефективності алгоритмів при обробці кадрів із об'єктом, що рухається (BBMR, CTCD, час обробки кадру)

Спотворення зображення. Boosting, CSRT, MIL показали хороший результат у фокусуванні на об'єкті при наявності білого шуму та періодичного зміщення об'єкта в сторону – див. рис. 21.

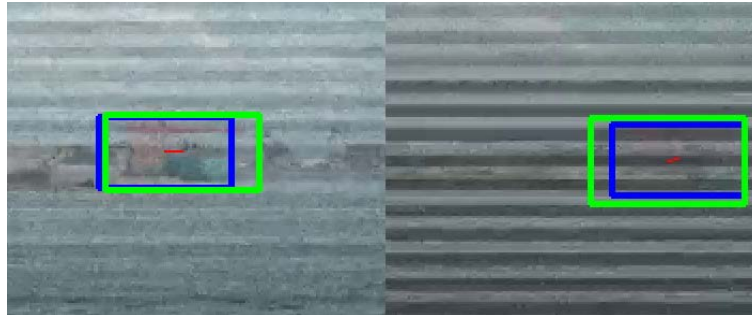


Рис. 21. Збереження фокусу на зображенні при білому шумі та зміщенні в сторону (Boosting)

KCF майже весь час був поза кадром, проте іноді коректно фокусувався на об'єкті після зниження рівню спотворення. MedianFlow частково був поза кадром, частково фокусувався на неправильній області у випадковому порядку, ні разу не сфокусувався правильно. MOSSE був поза кадром весь час. TLD зберігав фокус при відсутності спотворення, а під час спотворення фокусувався на неправильній області у випадковому порядку. Також мав тенденцію збільшувати витрату часу на кадр приблизно у 2–3 рази під час спотворення зображення (див. рис. 22).

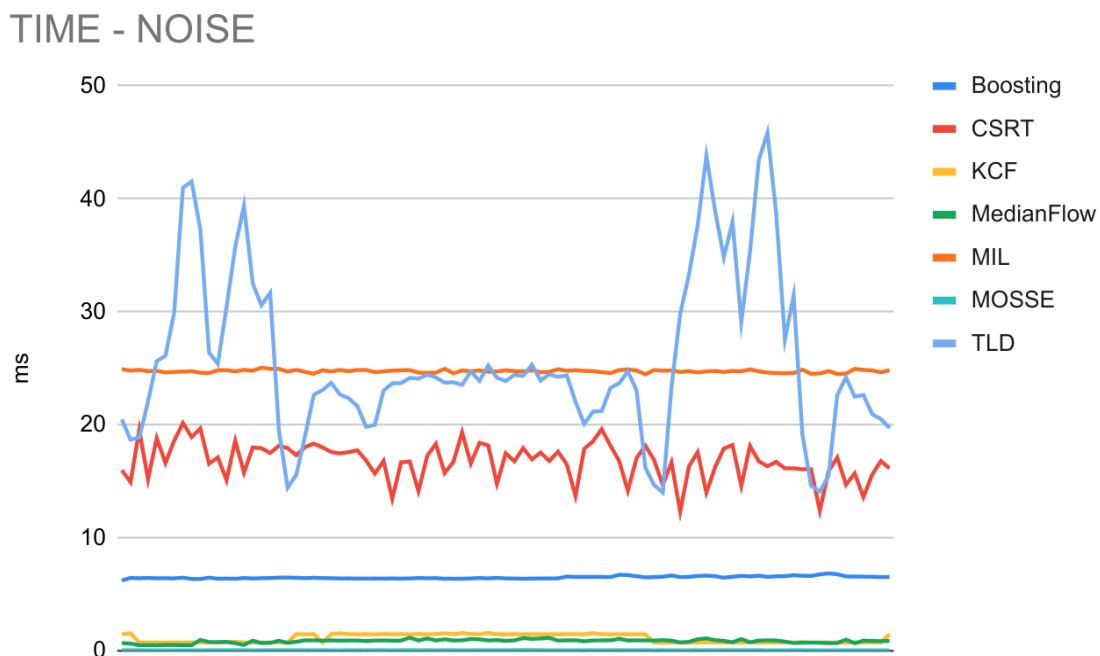


Рис. 22. Збільшення витрат часу TLD під час спотворення зображення

TLD складається із декількох етапів: відстеження, навчання, визначення об'єктів. Якщо вхідні дані мають низьку якість або велику кількість шуму, алгоритму може бути складно відстежувати об'єкти, що призводить до додаткових обчислень для коригування результатів, а відповідно і збільшення витрат часу – див. рис. 23.

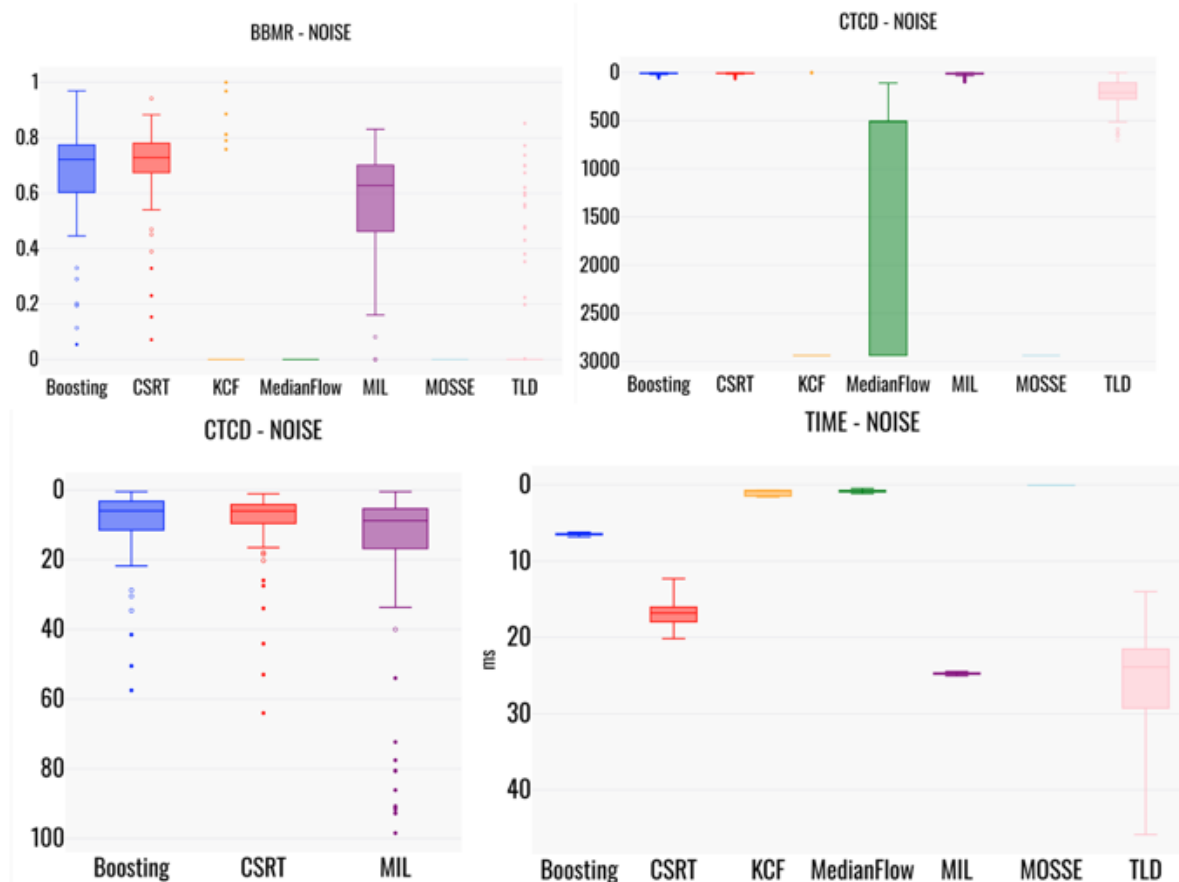


Рис. 23. Показники ефективності алгоритмів при обробці кадрів із спотворенням зображення (BBMR, CTCD, час обробки кадру)

Перепона перед об'єктом. У якості відео для експериментів було відтворено ситуацію коли при русі дрона на деякий час автомобіль перекривається стовпом, а потім знову з'являється у кадрі (див. рис. 24). Поведінку алгоритмів при даному експерименті можна поділити на 3 категорії:

1. Точний початковий фокус, подальший фокус на перепоні після втрати об'єкта (CSRT, MIL, Boosting, MedianFlow).
2. Точний початковий фокус, коректна втрата фокусу після втрати об'єкта, неможливість сфокусуватись на об'єкті після його появи у кадрі (KCF, Mosse).
3. Точний початковий фокус, фокусування на випадкових об'єктах під час перепони у кадрі, відновлення фокусу на об'єкті після його появи у кадрі (TLD).

CSRT, MIL, Boosting не змогли коректно зреагувати на появу перепони і до кінця відео зберігали фокус на стовпі. Алгоритми KCF та Mosse коректно фокусувались на авто до появи стовпа, після чого фокусувались на довільних об'єктах у різних позиціях кадру до кінця відео (інші авто, вікна, паркани тощо). TLD також мав тенденцію довільного фокусування під час наявності перепони, але зміг відновити коректний фокус на авто після її зникнення.

Зміна масштабу об'єкта. Експериментальні дані: відео, де камера дрону стрімко наближається до авто, в кінці відео авто заповнює весь кадр. CSRT, MedianFlow вдало масштабували рамку (див. рис. 25). CSRT залишався в кадрі, зупинивши масштабування рамки ближче до кінця відео, зберігаючи однаковий розмір. MedianFlow втратив фокус, коли об'єкт майже заповнив екран.

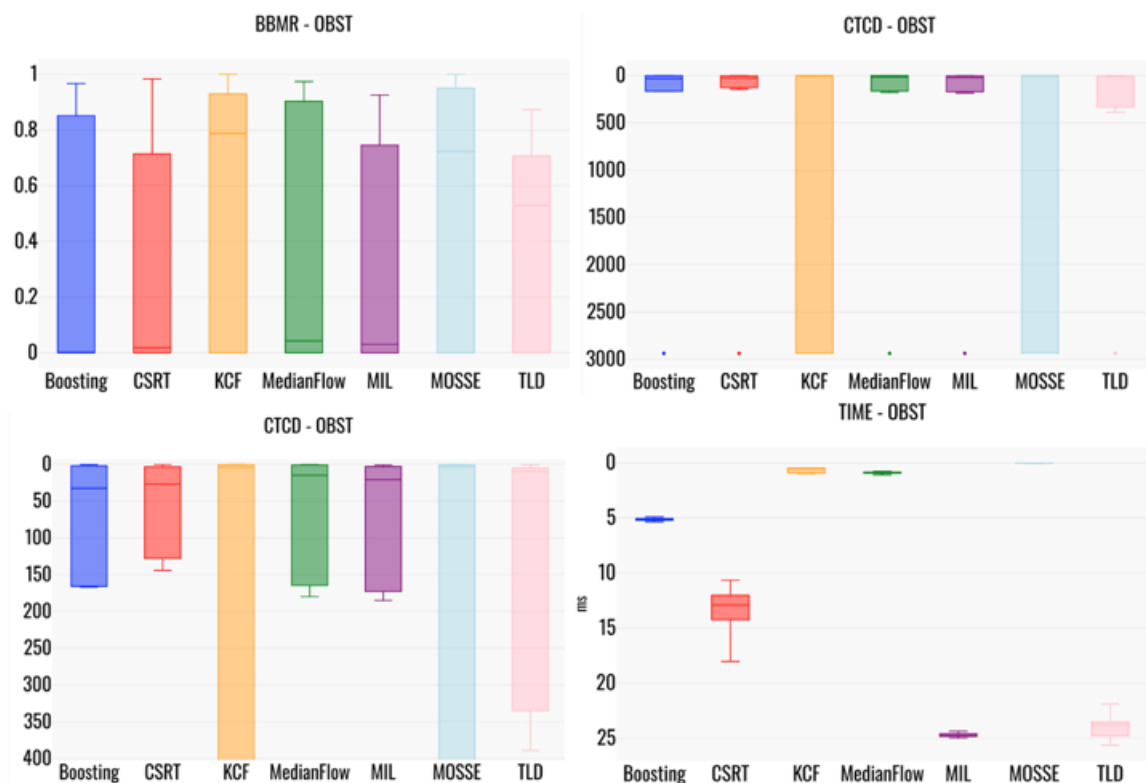


Рис. 24. Показники ефективності алгоритмів при обробці кадрів із появою перепони перед об'єктом (BBMR, CTCD, час обробки кадру)



Рис. 25. Масштабування розміру рамки при наближенні (CSRT, приблизна ситуація в MedianFlow)

TLD масштабував рамку, проте під час збільшення були незначні стрибки в різні сторони (див. рис. 26). Загалом вдало тримав приблизну позицію і фокус до самого кінця експериментального відео.

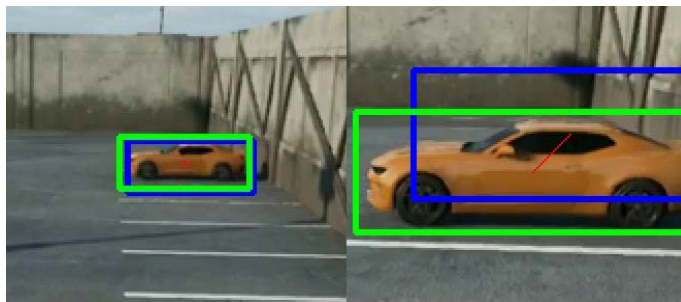


Рис. 26. Стрибки під час збільшення (TLD)

Boosting, MIL, MOSSE не масштабували розмір рамки. MOSSE був приблизно в центрі, але втратив фокус в кінці. Boosting тримав фокус, але змістився ліворуч. Для MIL були характерні стрибки всередині очікуваної рамки. KCF втратив фокус на ранньому етапі під час збільшення об'єкта. На рис. 27 зображено статистику роботи алгоритмів.

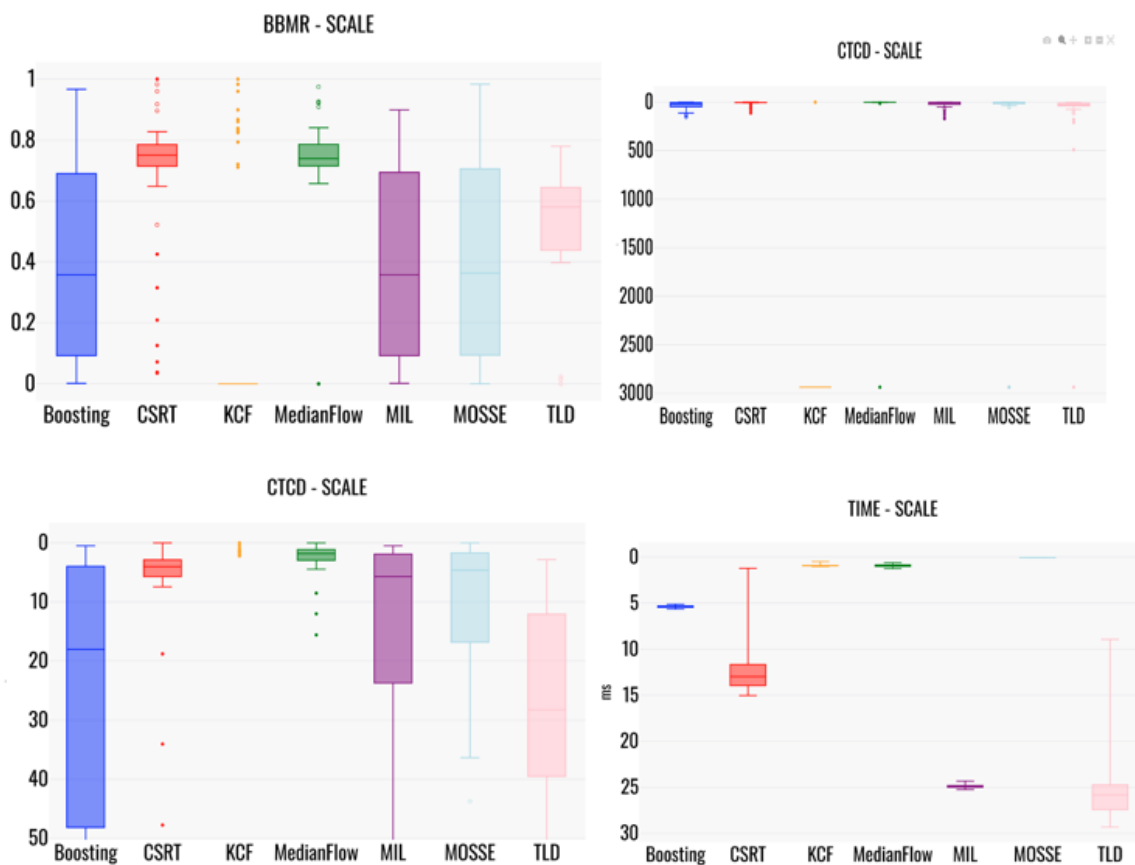


Рис. 27. Показники ефективності алгоритмів при обробці кадрів із зміною масштабування об'єкта (BBMR, CTCD, час обробки кадру)

Висновки. У даній роботі була досліджена поведінка 7 алгоритмів відстеження об'єктів OpenCV із поширеними проблемними ситуаціями на кадрах із БПЛА. Результати показали, що алгоритми мають свої переваги та недоліки, та їх ефективність може значно коливатися залежно від умов. Під час досліджень було виявлено, що певні алгоритми проявляють схожу поведінку у певних сценаріях. Алгоритми Boosting та CSRT показували схожу продуктивність у всіх експериментах крім останнього – зміни масштабу об'єкта. Також CSRT витрачав значно більше часу на обробку кадрів (у 2–5 рази більше). MIL, MOSSE, TLD погано справляються з відстеження, коли на кадрі присутні ідентичні об'єкти. TLD – єдиний алгоритм, який здатен відносно вдало фокусуватись на об'єкті при стрімкій зміні позиції та розмитті зображення, за умови, що відстежуваний об'єкт добре контрастує із фоном. Boosting, CSRT, MIL непогано утримують позицію об'єкта та його зміщення при спотворенні зображення, за умови, якщо в оригінальному кадрі без спотворень позиція на кадрі залишається відносно сталою. Із усіма результатами, набором експериментальних зразків, візуалізацією та скриптами розрахунку можна ознайомитись у GitHub репозиторії даної роботи [20].

Таблиця 2

Відсоток кадрів із BBMR >0.5 при обробці кадрів із проблемними ситуаціями

BBMR > 0.5 (%)	Boosting	CSRT	KCF	MedianFlow	MIL	MOSSE	TLD
ANGL_CH	74	78	76	47	74	76	51
FST_MOT	2	7	2	17	5	0	22
ID_OBJ	100	100	100	100	2	0	4
MOV_OBJ	60	68	61	100	41	56	82
NOISE	90	92	10	0	73	0	13
OBST	39	34	56	39	37	56	54
SCALE	40	88	23	87	40	40	62

Таблиця 3

Відсоток кадрів із BBMR >0.25 при обробці кадрів із проблемними ситуаціями

BBMR > 0.25 (%)	Boosting	CSRT	KCF	MedianFlow	MIL	MOSSE	TLD
ANGL_CH	100	100	90	79	100	100	100
FST_MOT	4	12	2	24	6	0	77
ID_OBJ	100	100	100	100	2	0	19
MOV_OBJ	100	100	100	100	100	100	100
NOISE	96	97	10	0	85	0	19
OBST	44	41	56	46	44	56	63
SCALE	58	92	23	87	58	58	95

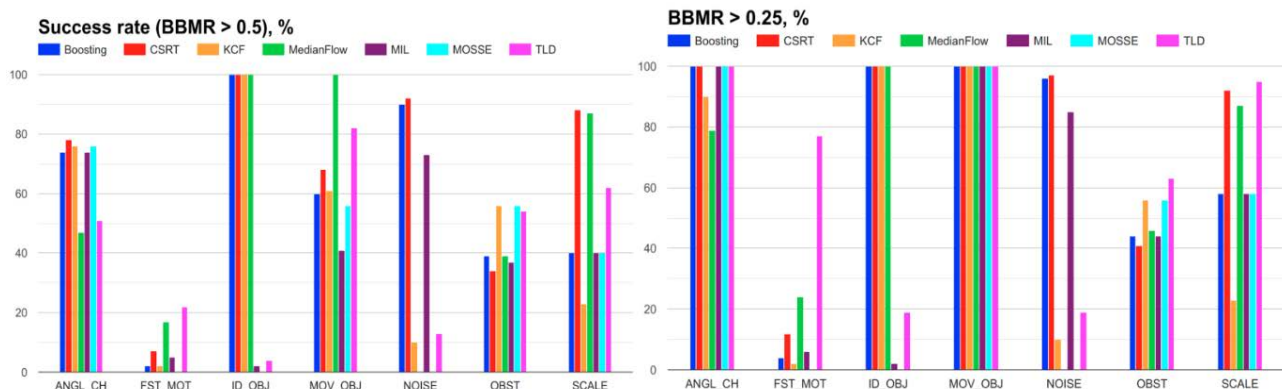


Рис. 28. Показники успішності алгоритмів (BBMR > 0.5 (ліворуч)) та BBMR > 0.25 (праворуч) для усіх експериментів

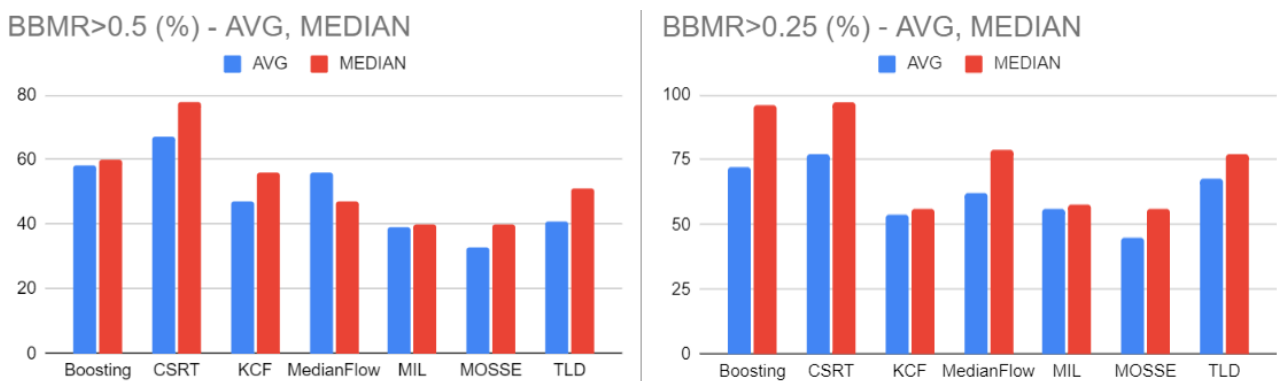


Рис. 29. Середнє число та медіана показників BBMR > 0.5 (ліворуч) і BBMR > 0.25 (праворуч)

Швидкодія CSRT та TLD більше залежала від зміни умов, ніж у інших алгоритмах, про це свідчить більший діапазон значень на графіках витрат часу. Перспективним покращенням швидкодії було б використання наявних оптимізацій у OpenCV, таких як багатоядерна паралелізація етапів роботи алгоритму та використання обчислювальної спроможності відеокарт [21].

Для досягнення кращих результатів у реальних умовах необхідно проводити дослідження можливості комбінації алгоритмів, їх реініціалізації в режимі реального часу, обробки зображень перед застосуванням алгоритмів. На рис. 28 зображено статистику успішності алгоритмів для різних експериментів – відсоток значень із індексом BBMR, більшим за 0.5 та 0.25. На рис. 29 зображено загальну статистику успішності алгоритмів для всіх експериментів.

References

1. Wu, Y., Lim, J., Yang, M.-H. (2013). Online Object Tracking: A Benchmark. *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Jun. 2013, P. 2411–2418. DOI: 10.1109/cvpr.2013.312.
2. Li, D., Liang, B., Zhang, W. (2014). Real-time moving vehicle detection, tracking, and counting system implemented with OpenCV. *2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology*, Apr. 2014, P. 631–643. DOI: 10.1109/icist.2014.6920557.
3. Wu, Y., Lim, J., Yang, M.-H. (2015). Object Tracking Benchmark. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Sep. 01, 2015, Vol. 37, No. 9, P. 1834–1848. doi: 10.1109/tpami.2014.2388226.
4. RF Wireless Vendors and Resources | RF Wireless World. 10 Advantages And Disadvantages Of Radio Frequency (RF) Waves And Its Uses. URL: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-RF.html>.
5. OpenCV. About OpenCV. URL: <https://opencv.org/about.html>.
6. Rochette, L. Uncrashed: FPV Drone Simulator on Steam. URL: https://store.steampowered.com/app/1682970/Uncrashed_FPV_Drone_Simulator/
7. Lukežič, A., Vojříř, T., Čehovin Zajc, L., Matas, J., Kristan, M. (2018). Discriminative Correlation Filter Tracker with Channel and Spatial Reliability. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 126, No. 7, P. 671–688. DOI: 10.1007/s11263-017-1061-3.
8. Henriques, J. F., Caseiro, R., Martins, P., Batista, J. (2015). High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Mar. 01, 2015, Vol. 37, No. 3, P. 583–596. DOI: 10.1109/tpami.2014.2345390.

Література

1. Wu Y., Lim J., Yang M.-H. Online Object Tracking: A Benchmark. *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Jun. 2013. P. 2411–2418. DOI: 10.1109/cvpr.2013.312.
2. Li D., Liang B., Zhang W. Real-time moving vehicle detection, tracking, and counting system implemented with OpenCV. *2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology*. Apr. 2014. P. 631–643. DOI: 10.1109/icist.2014.6920557.
3. Wu Y., Lim J., Yang M.-H. Object Tracking Benchmark. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Sep. 01, 2015. Vol. 37, No. 9. P. 1834–1848. DOI: 10.1109/tpami.2014.2388226.
4. 10 Advantages And Disadvantages Of Radio Frequency (RF) Waves And Its Uses. *RF Wireless Vendors and Resources | RF Wireless World*. URL: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-RF.html>.
5. About OpenCV. *OpenCV*. <https://opencv.org/about.html>.
6. Rochette L. Uncrashed: FPV Drone Simulator on Steam. URL: https://store.steampowered.com/app/1682970/Uncrashed_FPV_Drone_Simulator/
7. Lukežič A., Vojříř T., Čehovin Zajc L., Matas J., Kristan M. Discriminative Correlation Filter Tracker with Channel and Spatial Reliability. *International Journal of Computer Vision*. Jan. 08, 2018. Vol. 126, No. 7. P. 671–688. DOI: 10.1007/s11263-017-1061-3.
8. Henriques J. F., Caseiro R., Martins P., Batista J. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.

9. Danelljan, M., Khan, F. S., Felsberg, M., Van De Weijer, J. (2014). Adaptive Color Attributes for Real-Time Visual Tracking. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Jun. 2014. DOI: 10.1109/cvpr.2014.143.
10. Henriques, J. F., Caseiro, R., Martins, P., Batista, J. (2012). Exploiting the Circulant Structure of Tracking-by-Detection with Kernels. *Computer Vision – ECCV 2012*. P. 702–715. DOI: 10.1007/978-3-642-33765-9_50.
11. Babenko, B., Yang, M.-H., Belongie, S. (2009). Visual tracking with online Multiple Instance Learning. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Jun. 2009. DOI: 10.1109/cvpr.2009.5206737.
12. Grabner, H., Grabner, M., Bischof, H. (2006). Real-Time Tracking via On-line Boosting. *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2006*. British Machine Vision Association, 2006. DOI: 10.5244/c.20.6.
13. Kalal, Z., Mikolajczyk, K., Matas, J. (2010). Forward-Backward Error: Automatic Detection of Tracking Failures. *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*, IEEE, Aug. 2010. DOI: 10.1109/icpr.2010.675.
14. Bolme, D., Beveridge, J. R., Draper, B. A., Lui, Y. M. (2010). Visual object tracking using adaptive correlation filters. *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Jun. 2010. DOI: 10.1109/cvpr.2010.5539960.
15. Kalal, Z., Mikolajczyk, K., Matas J. (2012). Tracking-Learning-Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Jul. 2012, Vol. 34, No. 7, P. 1409–1422. DOI: 10.1109/tpami.2011.239.
16. Hancock, J. M. (2004). Jaccard Distance (Jaccard Index, Jaccard Similarity Coefficient). *Dictionary of Bioinformatics and Computational Biology*. Wiley, Oct. 15, 2004. DOI: 10.1002/9780471650126.dob0956.
17. timeit – Measure execution time of small code snippets – Python 3.9.0 documentation. *docs.python.org*. URL: <https://docs.python.org/3/library/timeit.html>.
18. Advanced box and whisker plot maker. *Statistics Kingdom*, 2017. URL: <https://www.statskingdom.com/advanced-boxplot-maker.html>.
- Mar. 01, 2015. Vol. 37, No. 3. P. 583–596. DOI: 10.1109/tpami.2014.2345390.
9. Danelljan M., Khan F. S., Felsberg M., Van De Weijer J. Adaptive Color Attributes for Real-Time Visual Tracking. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Jun. 2014. DOI: 10.1109/cvpr.2014.143.
10. Henriques J. F., Caseiro R., Martins P., Batista J. Exploiting the Circulant Structure of Tracking-by-Detection with Kernels. *Computer Vision – ECCV 2012*. 2012. P. 702–715. DOI: 10.1007/978-3-642-33765-9_50.
11. Babenko B., Yang M.-H., Belongie S. Visual tracking with online Multiple Instance Learning. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Jun. 2009. DOI: 10.1109/cvpr.2009.5206737.
12. Grabner H., Grabner M., Bischof H. Real-Time Tracking via On-line Boosting. *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2006*. British Machine Vision Association, 2006. DOI: 10.5244/c.20.6.
13. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Forward-Backward Error: Automatic Detection of Tracking Failures. *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*, IEEE, Aug. 2010. DOI: 10.1109/icpr.2010.675.
14. Bolme D., Beveridge J. R., Draper B. A., Lui Y. M. Visual object tracking using adaptive correlation filters. *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Jun. 2010. DOI: 10.1109/cvpr.2010.5539960.
15. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-Learning-Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Jul. 2012. Vol. 34, No. 7. P. 1409–1422. DOI: 10.1109/tpami.2011.239.
16. Hancock J. M. Jaccard Distance (Jaccard Index, Jaccard Similarity Coefficient). *Dictionary of Bioinformatics and Computational Biology*. Wiley, Oct. 15, 2004. DOI: 10.1002/9780471650126.dob0956.
17. timeit – Measure execution time of small code snippets – Python 3.9.0 documentation. *docs.python.org*. URL: <https://docs.python.org/3/library/timeit.html>.
18. Advanced box and whisker plot maker. *Statistics Kingdom*, 2017. URL: <https://www.statskingdom.com/advanced-boxplot-maker.html>.

19. Chart maker. *Statistics Kingdom*, 2017. URL: <https://www.statskingdom.com/chart-maker.html>.
20. OpenCV object trackers analysis for UAV. *GitHub repository*, 2024. URL: <https://github.com/valposv/opencv-obj-trackers-analysis-for-uav>.
21. Janku, P., Koplik, K., Dulik, T., Szabo, I. (2016). Comparison of tracking algorithms implemented in OpenCV. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 76, P. 4. DOI: 10.1051/mateconf/20167604031.
19. Chart maker. *Statistics Kingdom*, 2017. URL: <https://www.statskingdom.com/chart-maker.html>.
20. OpenCV object trackers analysis for UAV. *GitHub repository*, 2024. URL: <https://github.com/valposv/opencv-obj-trackers-analysis-for-uav>.
21. Janku P., Koplik K., Dulik T., Szabo I. Comparison of tracking algorithms implemented in OpenCV. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 76. P. 4. DOI: 10.1051/mateconf/20167604031.

POSVISTAK VALERII

Postgraduate Student,
Faculty of Mechatronics and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies and Design,
Ukraine
<https://orcid.org/0009-0001-7785-1378>
E-mail: valposv@gmail.com

MIROSHNYCHENKO DMYTRO

Postgraduate Student,
Faculty of Mechatronics and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies and Design,
Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-0904-1645>
E-mail: dmiroshnycheko@gmail.com

POSVISTAK V. S., MIROSHNYCHENKO D. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

ANALYSIS OF OPENCV OBJECT TRACKING ALGORITHMS WHEN PROCESSING UAV FRAMES

Purpose. Investigation and comparison of OpenCV object tracking algorithms effectiveness when processing frames with typical problems for images from UAV cameras. Conducting experiments to determine advantages and disadvantages, failure tendencies, time performance issues.

Methodology. Experimental videos were recorded in a FPV-drone flight simulator for seven typical problems. Correct behavior (ground truth) was defined manually using Python scripts with a bounding box input. Typical problems were determined: angle change, object position change, presence of identical objects, moving object, image noise, obstacle in front of an object, object size scaling. Python scripts were developed and used to automate calculation of four effectiveness criteria: bounding box match rate, center to center distance, success rate, time spent per frame.

Findings. Investigated effectiveness of Boosting, CSRT, KCF, MedianFlow, MIL, Mosse, TLD algorithms when processing frames with problems typical for images from UAV cameras. Carried out an analysis of failure tendencies, similarities between different algorithms, time performance issues. The experiments results were presented as tables with raw values, charts and human-friendly visualization of each algorithm's work.

Originality. According to the results of the research, the tendencies of object tracking algorithms to work incorrectly when processing frames with problems typical for images taken from a UAV camera were determined.

Practical value. The results can be used for prioritization of certain object tracking algorithms usage or combination, depending on the field of application.

Keywords: object tracking; object detection; drone technologies; UAV; image processing; OpenCV.

УДК 677.
055.32:
677.017:
677.075

¹ДМИТРИК О. М., ¹ГАЛАВСЬКА Л. Є., ²ХАРЧЕНКО Ю. М.

¹Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

²АДВЛ «ТЕКСТИЛЬ-ТЕСТ», Київ, Україна

ВПЛИВ ТИПУ ПЛОСКОВ'ЯЗАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ПОКАЗНИКИ СТІЙКОСТІ ТРИКОТАЖНОГО МАТЕРІАЛУ З ВИСОКОМІЦНИХ НИТОК ДО ДІЇ МЕХАНІЧНИХ УШКОДЖЕНЬ (ПРОКОЛ СТЕРЖНЕМ ТА ПРОДАВЛЮВАННЯ КУЛЬКОЮ)

Мета. Дослідити вплив особливостей процесу формування на плосков'язальному обладнанні двох типів (з платинами та без) трикотажного матеріалу переплетення кулірна гладь з ниток підвищеної міцності на характеристики його стійкості до дії механічних ушкоджень (прокол стержнем, продавлювання кулькою).

Методика. Для визначення характеристик стійкості трикотажних матеріалів до проколу стержнем та продавлювання кулькою використано існуючі стандартизовані методи досліджень. Дослідження стійкості до проколу стержнем та продавлювання кулькою виконано на розривній машині КТ-7010AZ. Шляхом реалізації активного однофакторного експерименту встановлено вплив зміни глибини кулірування на характеристики стійкості трикотажного матеріалу до проколу та продавлювання кулькою у відповідності до обраного типу плосков'язального обладнання. Для обробки експериментальних даних та побудови графіків і діаграм використано інструменти програми Microsoft Excel.

Результати. Шляхом реалізації експериментальних досліджень виявлено фактори, що впливають на стійкість розроблених зразків трикотажних матеріалів до проколу стержнем та продавлювання кулькою, а саме: вид високоміцних ниток, тип плосков'язального обладнання, глибина кулірування. Вищий рівень стійкості до досліджуваних показників механічних ушкоджень демонструють трикотажні матеріали, вироблені на плосков'язальному обладнанні без платин. При цьому встановити межу міцності трикотажного матеріалу, виробленого з високомолекулярних поліетиленових ниток, до продавлювання кулькою не вдалося, оскільки напруга перевищувала 5000Н, шкала вимірювань розривної машини складає 5000Н. Проаналізовано характер деформації дослідних зразків під впливом зусилля стержня та кульки. Проколу та продавлюванню передують руйнування окремої нитки в структурі трикотажного матеріалу. Але у випадку використання пара-арамідних ниток одразу внаслідок розриву нитки відбувається розпук петель і руйнування цілісності структури.

Наукова новизна. Встановлено, що на величину опору трикотажного матеріалу проколюванню стержнем та продавлюванню кулькою впливає не лише обраний вид високоміцних ниток та щільність в'язання, а й наявність платин на в'язальному обладнанні у процесі петлетворення.

Практична значимість. Математичні залежності, одержані у ході реалізації активного однофакторного експерименту, дозволяють розрахувати величину опору проколюванню й продавлюванню кулькою та обрати раціональні параметри виготовлення (вид високоміцних ниток, тип плосков'язального обладнання, глибину кулірування) у відповідності до необхідного рівня стійкості трикотажного матеріалу до досліджуваних показників механічних ушкоджень.

Ключові слова: пара-арамідна нитка; високомолекулярна поліетиленова нитка; високоміцний трикотажний матеріал; переплетення гладь; прокол стержнем; продавлювання кулькою.

Вступ. Створюючи трикотажні матеріали з сировини підвищеної міцності для їх подальшого використання у якості складових елементів засобів індивідуального захисту, текстильних матеріалів для спеціального одягу робітників промислових професій та захисного одягу спортсменів, у першу чергу потрібно розуміти який рівень захисту вони забезпечуватимуть. На стійкість текстильного матеріалу до дії механічних ушкоджень впливає ціла низка факторів. У першу чергу – це вид сировини, з якого його вироблено, структура

переплетення та параметри його в'язання. Однак, на структурні характеристики трикотажного матеріалу впливає також і тип плосков'язального обладнання, а саме наявність або відсутність платин у процесі формування петель. Саме цей фактор обумовлює різну будову петель [1, 2] і, як наслідок, призводитиме до різного характеру руйнування трикотажного матеріалу під дією механічних ушкоджень.

Виходячи з того, що на сьогодні високоміцні нитки широко використовуються у найрізноманітніших сферах, зокрема у виробках технічного призначення, засобах індивідуального захисту від експлуатаційних характеристик яких залежить життя та здоров'я людини, увага науковців прикута до дослідження факторів, що впливають на міцнісні характеристики даних видів сировини [3–5].

Робота [6] присвячена дослідженню стійкості до проколу та прорізування трикотажних матеріалів різних переплетень. Авторами розроблено нові структури, які мають однакову поверхню лицьової та виворітної сторін. На основі даних структур з використанням пара-арамідних ниток з обробкою та без на плосков'язальному обладнанні виготовлено трикотажні матеріали та здійснено порівняльний аналіз з трикотажем переплетень гладь та плюшеве. За умови однакової поверхневої густини та товщини трикотажних матеріалів запропоновані нові структури продемонстрували кращу стійкість до прорізування та проколу, особливо у разі обробки поверхні пара-арамідних ниток. У роботі не ставилося за мету з'ясувати вплив зміни щільності в'язання на досліджувані характеристики трикотажного матеріалу з обраного виду високоміцних ниток.

Робота [7] присвячена дослідженню стійкості трикотажних полотен із введенням у структуру ґрунту утокової нитки до механічних ризиків в залежності від вмісту базальтової сировини у структурі текстильного матеріалу. Авторами вивчено характер впливу введення у структуру зовнішнього шару трикотажного матеріалу базальтової нитки на показники його стійкості до прорізування, проколу та розриву. Виявлено, що найвищої стійкості до проколу досягнуто у трикотажних структурах з найвищим вмістом високомолекулярного поліетилену, а збільшення вмісту базальтової сировини у трикотажній структурі не сприяло покращенню зазначеного показника.

Авторами іншої роботи [8] досліджено стійкість трикотажного матеріалу переплетення гладь з високомолекулярної поліетиленової нитки та з введенням у структуру у вигляді футерної додаткової еластомерної нитки до зусилля проколу та величину його деформації під впливом стержня. Встановлено, що збільшення довжини нитки в петлі обумовлює більшу пористість структури, що і призводить до зменшення кількості відрізків ниток, які опираються зусиллю проколу. Однак, у роботі використано лише один вид високоміцних ниток, що не дає можливості співставити одержані результати.

Робота [9] присвячена дослідженню впливу виду сировини шарів двошарового трикотажного матеріалу та структури переплетення шару, до якого прикладене перфоруєче зусилля. Однак досліджуваний трикотажний матеріал вироблений подвійним переплетенням на двофонтурному обладнанні без платин, що не дає можливості оцінити стійкість до проколу одношарової структури, виробленої з високомолекулярних поліетиленових чи пара-арамідних ниток.

Авторами іншої роботи [10] досліджено стійкість до проколу розробленого трикотажного ауксетик-матеріалу з введеними у структуру утоковими нитками, що розташовані ромбоподібно. Вивчено вплив швидкості руху пуансона на стійкість до проколу одержаного ауксетик-матеріалу та виготовленого за тих самих умов трикотажного матеріалу без введення у структуру еластомерної нитки з тією ж довжиною нитки в петлі. Результати показують, що ауксетичний утоковий трикотаж має вище пікове навантаження та здатність до поглинання енергії при квазістатичному навантаженні. Результати також показують, що

квазістатичний опір удару аукзетичного трикотажного полотна посилюється зі збільшенням швидкості проколу, але мало змінюється після того, як швидкість проколу досягає певного значення (50 мм/хв).

Робота [11] присвячена дослідженню опору проколюванню та продавлюванню кулькою одношарових трикотажних матеріалів, виготовлених з поліетиленових та пара-арамідних ниток, та двошарових пакетів матеріалів у поєднанні з шаром трикотажу з мета-арамідних ниток. У випадку проколу стержнем найвищі результати опору демонструють двошарові пакети трикотажних матеріалів, при продавлюванні кулькою – трикотажні матеріали, вироблені з використанням поліетиленових ниток.

У роботі [12] висвітлено результати досліджень опору продавлюванню кулькою трикотажного матеріалу переплетення кулірна гладь з поліестерових ниток. Автори роботи акцентують увагу, що на величину опору продавлюванню та видовження трикотажного матеріалу до моменту його руйнування має наявність дефектів петельної структури.

Постановка завдання. Аналіз наукових праць за напрямом дослідження дозволяє стверджувати, що питання розробки трикотажних матеріалів з високоміцних ниток та дослідження факторів, що впливають на їх стійкість до проколювання, наразі є актуальними та залишаються у полі зору дослідників. При цьому вплив типу в'язального обладнання (з платинами або без) на характеристики стійкості трикотажного матеріалу до дії механічних ушкоджень вивчено недостатньо. Тому доцільним є проведення досліджень саме у цьому напрямку з метою визначення раціональних параметрів в'язання трикотажних матеріалів з високоміцних ниток, стійких до дії механічних впливів.

Об'єкти і методи дослідження. Об'єктом є процес перфорації трикотажних матеріалів, вироблених з високомолекулярної поліетиленової (*UHMWPE*, *pE*) та пара-арамідної (*pA*) ниток на двох типах плосков'язального обладнання 8 класу: без платин типу плоскофангового напів-автомату ПВРК та з використанням платин типу плосков'язального рукавичкового автомату ПА-8-33 (РА).

У якості вхідного параметра для реалізації активного експерименту обрано глибину кулірування, яка змінювалася на п'яти рівнях у заданому діапазоні [2]. Для плоскофангового напів-автомату типу ПВРК із загальним зусиллям відтягування полотна глибина кулірування для *UHMWPE* нитки складала від 3,2÷3,56 мм, для *pA* нитки – 3,09÷3,45 мм з кроком 0,1 мм. У разі виготовлення дослідних зразків на плосков'язальному автоматі з платинами типу рукавичковий автомат (РА) ПА-8-33 глибина кулірування складала для *UHMWPE* нитки 3,55÷3,95 мм, для *pA* нитки – 3,4÷3,8 мм з кроком 0,9 мм. Характеристика дослідних зразків трикотажних матеріалів наведена у попередній роботі [2].

Дослідження опору продавлюванню кулькою та проколу стержнем попередньо вироблених зразків трикотажних матеріалів з високоміцних ниток на двох типах в'язального обладнання (з платинами та без) [2] виконано згідно відповідних стандартизованих методик [13, 14] в акредитованій лабораторії КНУТД АДВЛ «Текстиль-ТЕСТ».

Показники стійкості до продавлювання кулькою та проколу стержнем встановлено з використанням сучасної розривної машини моделі КТ-7010AZ (рис. 1, 2). Метод випробування стійкості трикотажного матеріалу до продавлювання кулькою та проколу стержнем передбачає підготовку випробувального зразка круглої форми діаметром 70 мм, який закріплюється у спеціальному пристрої в нижньому нерухомому затискачі лицьовою поверхнею назовні.

У верхньому рухомому затискачі закріплюється сталева кулька діаметром 25 мм, яка рухається вниз зі сталою швидкістю 100 мм/хв до руйнування трикотажного матеріалу. Перед початком дослідження кулька повинна знаходитися у центрі проби та торкатися його поверхні [14].



Рис. 1. Універсальна тестова машина
Као Тієн моделі KT-7010AZ



Рис. 2. Фото використаних інструментів

Для випробування стійкості матеріалу до проколу згідно стандартизованої методики EN 388-2019 [13], кульку замінюють на металевий стержень прямокутної форми з гранню 4,5 мм з затупленим краєм та глибиною проколу 25 мм. Аналогічно стержень має бути розташований у центрі проби. Рух стержня відбувається з постійною швидкістю 500 мм/хв у вертикальному напрямку вниз до наскрізної перфорації. Опір, який чинить текстильний матеріал до повної перфорації, вимірюється в Ньютонів і визначає його стійкість до проколювання. Максимальна прикладена до випробувального зразка сила вимірювання, яку може забезпечити використана розривна машина становить до 5000Н.

Результати досліджень Для встановлення з використанням методу регресійного аналізу з довірчою ймовірністю 95% [15] однофакторних математичних залежностей, що описують вплив щільності в'язання на досліджувані показники (опір продавлюванню кулькою та проколюванню стержнем), виконано по п'ять повторних випробувань для кожного з п'яти рівнів вхідного параметра.

Результати дослідження стійкості до продавлювання кулькою.

У відповідності до [16] на сьогодні метод продавлювання кулькою використовують для виявлення характеру деформації та міцності волокон гнучкої шкіри або готової поверхні верху взуття до моменту руйнування. Вибір даного методу для дослідження трикотажних матеріалів обумовлено використанням для їх виготовлення високоміцних ниток та необхідністю вивчення характеру деформації петельної структури під дією перфоруючого зусилля кульки.

На рис. 3 представлено графіки деформації та моменту руйнування під дією зусилля продавлювання кулькою структури трикотажних матеріалів, вироблених при мінімальному рівні глибини кулірування.

Слід зазначити, що на момент досягнення максимально можливого на розривній машині KT-7010AZ зусилля навантаження (5000Н) структура зразка, виготовленого з UHMWPE нитки на обладнанні без платин типу ПВРК при максимальній щільності в'язання не зруйнувалася (рис. 3а). Усі інші дослідні зразки досягнули моменту руйнування структури внаслідок прикладеного відповідного зусилля продавлювання кулькою.

На рис. 4 представлено фото моменту продавлювання трикотажного матеріалу кулькою, які наглядно ілюструють характер руйнування проби у випадку використання UHMWPE та рА ниток. З рис. 4 видно, що внаслідок зусилля продавлювання, кулька пройшовши наскрізь, зруйнувавши структуру зразка з UHMWPE нитки, а у випадку використання рА нитки відбулося руйнування нитки однієї петлі, що спричинило розпуск петель в петельних стовпчиках під дією зусилля кульки.

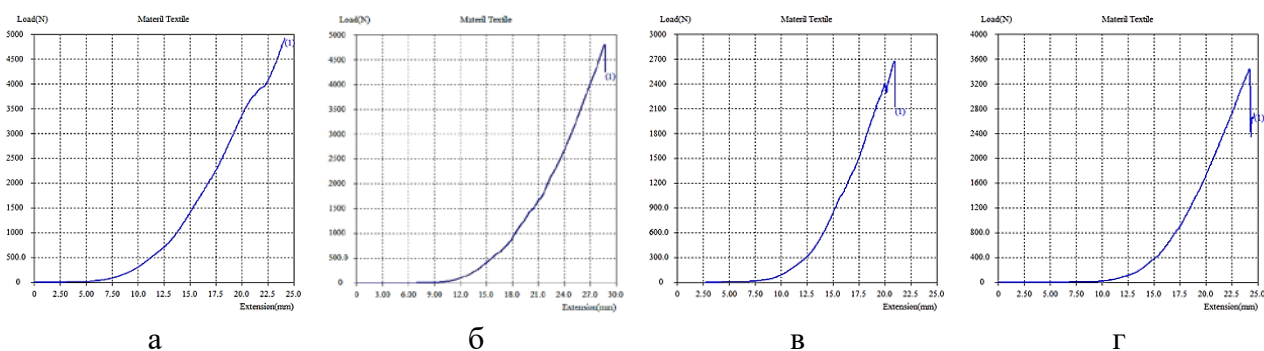


Рис. 3. Графіки опору продавлюванню кулькою трикотажних матеріалів, виготовлених при мінімальному рівні глибини кулірування: з UHMWPE нитки: а) без платин (типу ПВРК); б) з платинами (типу РА); з рА нитки: в) без платин (типу ПВРК); г) з платинами (типу РА)



Рис. 4. Фото моменту продавлювання кулькою трикотажних матеріалів, вироблених на РА

Одержані характеристики опору продавлюванню кулькою досліджуваних зразків трикотажних матеріалів для кожного з типів в'язального обладнання та рівня щільності в'язання наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики опору продавлюванню кулькою дослідних зразків трикотажних матеріалів

№ зразка	Тип в'язального обладнання											
	без платин типу ПВРК						з платинами типу РА					
	рівень глибини кулірування, мм		опір продавлюванню кулькою, Н		величина деформації, мм		рівень глибини кулірування, мм		опір продавлюванню кулькою, Н		величина деформації, мм	
	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA
1	3,20	3,09	Більше 5000	3153,62 ±272,39	20,0	11,9	3,55	3,40	4748,96 ±101,41	3504,90 ±196,13	25,7	15,4
2	3,29	3,18		3249,80 ±176,40	—	12,5	3,65	3,50	4825,82 ±65,67	3550,18 ±127,01	25,8	16,1
3	3,38	3,27		3468,60 ±201,72	—	14,1	3,75	3,60	4702,84 ±75,10	3473,78 ±145,24	25,4	17,8
4	3,47	3,36		3369,50 ±176,40	—	15,8	3,85	3,70	4589,00 ±65,67	3433,60 ±127,01	25,1	18,6
5	3,56	3,45		3324,74 ±272,39	21,6	16,7	3,95	3,80	4390,62 ±101,41	3398,10 ±196,13	25,7	19,5

Шляхом обробки експериментальних даних щодо опору продавлюванню кулькою та величини деформації одержано математичні залежності другого порядку, на підставі яких побудовано відповідні графіки, наведені на рис. 5. Як видно з графіків, представлених на рис. 5, залежність опору продавлюванню кулькою від глибини кулірування описується моделлю другого порядку та має вигляд параболи. Дослідити величину зусилля руйнування зразків трикотажних матеріалів, виготовлених на обладнанні без платин (типу ПВРК) з *UHMWPE* ниток, стало неможливим через характеристики розривального обладнання. Шкала вимірювань розривної машини КТ-7010AZ передбачає величину не більше 5000 Ньютон, а дослідні зразки не дійшли піку навантаження, внаслідок чого цей факт автоматично робить їх найстійкішими. Зразки, виготовлені з *pA* ниток демонструють різке збільшення сили опору при 3 рівні глибини кулірування $h_k = 3,27$ мм, після чого відбувається спадання.

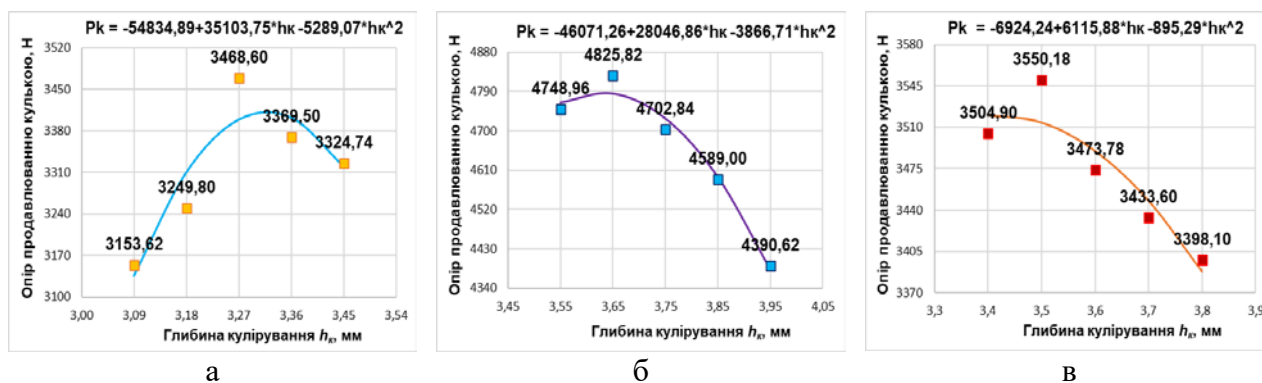


Рис. 5. Графіки залежності величини зусилля продавлювання кулькою від зміни щільності в'язання: з *UHMWPE* нитки: а) з платинами *PA*; з *pA* нитки: б) без платин ПВРК; в) з платинами *PA*

Такий результат пояснюється тим, що структура трикотажного матеріалу, виготовленого без участі платин, має зигзагоподібну будову петель з орієнтацією нитки в петлі у напрямку петельних стовпчиків. Під дією зусилля продавлювання кулькою відбувається незначний перерозподіл нитки з голкових та платинних дуг у палички петель та швидке руйнування прямолінійного відрізка нитки, що чинить опір й зупинка обладнання. Зі збільшенням глибини кулірування збільшується наскрізна пористість структури трикотажного матеріалу та зменшення кількості відрізків ниток, що опираються продавлюванню. Це і призводить до зменшення його стійкості до продавлювання кулькою.

У разі виготовлення дослідних зразків трикотажних матеріалів на обладнанні з платинами (типу *PA*) максимальний опір продавлюванню кулькою спостерігається при 2 рівні глибини кулірування незалежно від виду сировини, після чого зі зменшенням щільності в'язання відбувається зменшення стійкості петельної структури до зусилля продавлюванню кулькою. Подальше зменшення стійкості трикотажного матеріалу до продавлювання кулькою можна пояснити зменшенням кількості прямолінійних відрізків ниток, які припадають на площу поверхні кульки та чинять опір прикладеному зусиллю продавлювання.

І хоча нам не вдалося досягнути руйнування петельної структури трикотажного матеріалу, виготовленого без використання платин (типу ПВРК) з *UHMWPE* ниток, одержані результати формують уявлення про характер деформації петель в структурі переплетення під дією зусилля продавлювання кулькою. У таблиці 2 представлено фото дослідних зразків з двох типів плосков'язального обладнання (з платинами та без) при мінімальному та максимальному рівні глибини кулірування, що демонструють характер деформації під дією руйнуючого зусилля кульки.

Таблиця 2

**Характер деформації зразків трикотажних матеріалів під дією
 зусилля продавлювання кулькою**

Тип плосков'язального обладнання			
без платин типу ПВРК		з платинами типу РА	
з UHMWPE нитки			
Рівень глибини кулірування			
1	5	1	5
			
			

У таблиці 3 представлено фотографії, що демонструють характер руйнування структури трикотажного матеріалу для кожного з п'яти рівнів глибини кулірування під дією кульки. Дослідження характеру деформації дослідних зразків під дією зусилля продавлювання кулькою дозволяють зробити висновок, що у разі використання UHMWPE ниток спостерігається наскрізне руйнування проби під дією зусилля продавлювання кулькою, тоді як у зразках з РА ниток руйнування деформованої під впливом сили продавлювання кульки трикотажної структури обумовлене руйнуванням нитки найбільш напруженої петлі та розпуском петель вздовж петельного стовпчика.

На підставі встановлених значень величини деформації трикотажної структури під дією зусилля продавлювання кулькою побудовано відповідні графіки (рис. 6).

Виявлено, що у випадку використання UHMWPE нитки тип в'язального обладнання та щільність в'язання немає суттєвого впливу (рис. 6а). У разі виготовлення трикотажного матеріалу з РА ниток, зменшення щільності в'язання призводить до збільшення величини деформації структури на момент руйнування проби: для зразків з машини ПВРК – на 26,6%; для РА – на 40,3% (рис. 6б), що обумовлено фізико-механічними властивостями та поведінкою РА ниток в структурі трикотажу під дією зусилля продавлювання кулькою.

Результати дослідження стійкості до проколювання стержнем.

На рис. 7 представлено графіки руйнування структури трикотажного матеріалу при мінімальному рівні глибини кулірування, де наглядно можна спостерігати процес руйнування дослідного зразка під дією перфоруючого зусилля. Так, незважаючи на тип в'язального обладнання, діаграми «навантаження-видовження» зразків з UHMWPE ниток після досягнення максимального опору мають стрибок напруги внаслідок руйнування витягнутого одинарного відрізка нитки (рис. 7а,б). При руйнуванні зразків з РА ниток (рис. 7в,г) стрибка напруги не виявлено, що обумовлено характеристиками високоміцної сировини. Дану відмінність можна побачити на фотографіях, представлених на рис. 8.

Таблиця 3

**Характер деформації зразків трикотажних матеріалів
 під дією зусилля продавлювання кулькою**

Зразки, вироблені на обладнанні без платин типу ПВРК з рА нитки				
Рівень глибини кулірування				
1	2	3	4	5
Зразки, вироблені на обладнанні з платинами типу РА з UHMWPE нитки				
Рівень глибини кулірування				
1	2	3	4	5
Зразки, вироблені на обладнанні з платинами типу РА з рА нитки				
Рівень глибини кулірування				
1	2	3	4	5

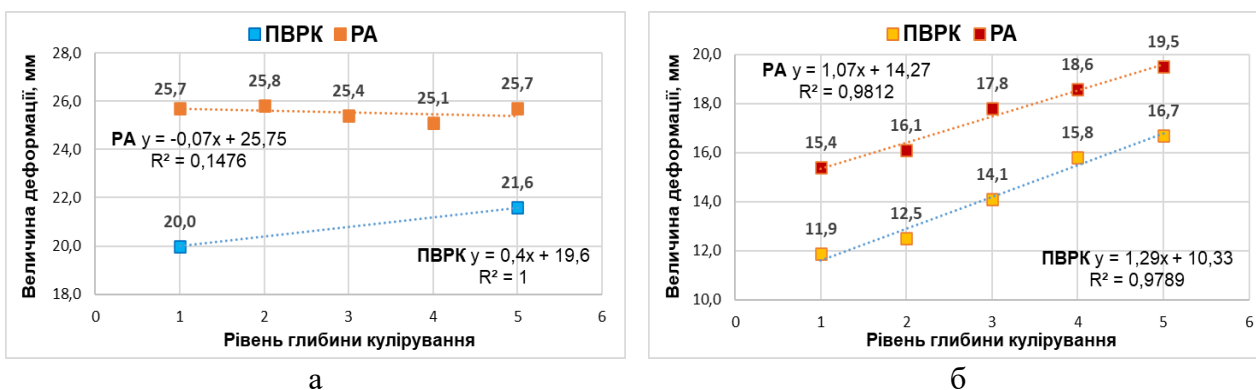


Рис. 6. Величина деформації зразків під дією зусилля продавлювання кулькою:
 а) з UHMWPE нитки; б) з рА нитки

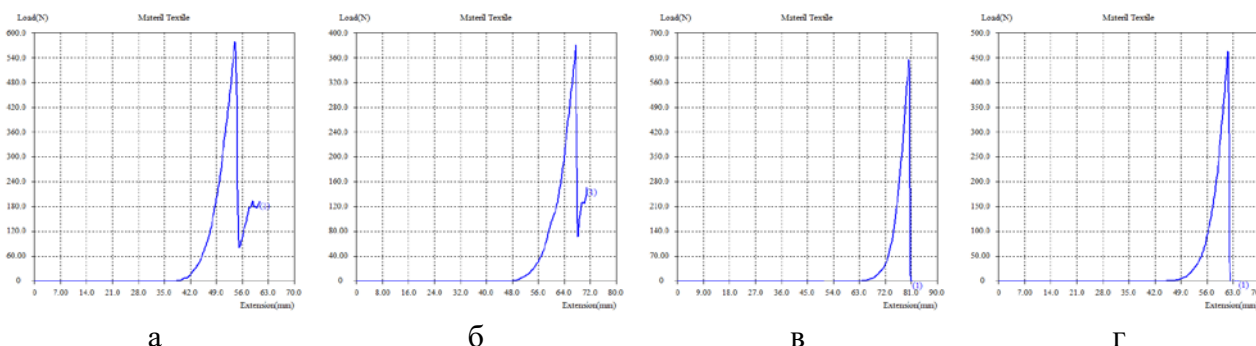


Рис. 7. Графіки опору проколу стержнем трикотажних матеріалів, виготовлених при мінімальному рівні глибини кулірування:
 з UHMWPE нитки: а) без платин (типу ПВРК); б) з платинами (типу РА);
 з рА нитки: в) без платин (типу ПВРК); г) з платинами (типу РА)



Рис. 8. Фото моменту проколу стержнем трикотажних матеріалів, вироблених на РА

Характеристики стійкості до проколу досліджуваних зразків трикотажних матеріалів для кожного типу плосков'язального обладнання, виду надмічної сировини та рівня глибини кулірування наведено у таблиці 4.

Шляхом реалізації активного однофакторного експерименту на підставі одержаних результатів випробувань встановлено відповідні регресійні математичні залежності, що описують вплив щільності в'язання на характеристики стійкості трикотажного матеріалу до проколу стержнем. У відповідності до даних регресійних залежностей побудовано відповідні графіки, які наглядно ілюструють вплив щільності в'язання на стійкість до проколу (рис. 9).

Таблиця 4

Характеристики опору проколу стержнем дослідних зразків трикотажних матеріалів

№ зразка	Тип плосков'язального обладнання											
	без платин типу ПВРК						з платинами типу РА					
	рівень глибини кулірування, мм		прокол стержнем, Н		величина деформації, мм	рівень глибини кулірування, мм		прокол стержнем, Н		величина деформації, мм		
	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA	pE	pA
1	3,20	3,09	473,00 ±30,65	551,94 ±83,46	12,3	3,0	3,55	3,40	382,26 ±17,73	478,50 ±67,49	21,2	5,0
2	3,29	3,18	438,42 ±21,67	507,10 ±45,38	13,2	3,4	3,65	3,50	349,76 ±12,53	465,00 ±37,31	22,1	5,0
3	3,38	3,27	422,76 ±17,70	477,84 ±20,59	15,7	4,0	3,75	3,60	326,56 ±10,23	435,90 ±18,37	21,9	5,0
4	3,47	3,36	408,10 ±21,67	447,22 ±45,38	16,7	4,8	3,85	3,70	307,90 ±12,53	406,72 ±37,31	23,4	5,0
5	3,56	3,45	394,82 ±30,65	430,44 ±83,46	17,0	5,0	3,95	3,80	290,68 ±17,73	369,12 ±67,49	23,8	5,0

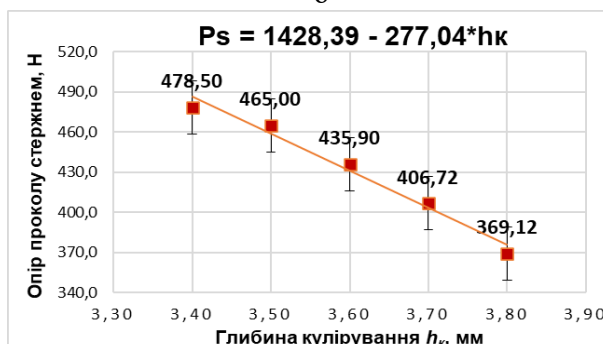
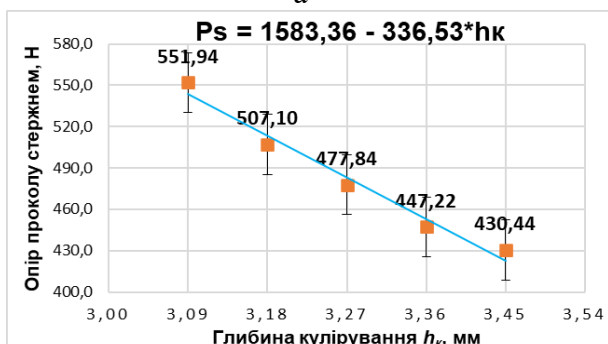
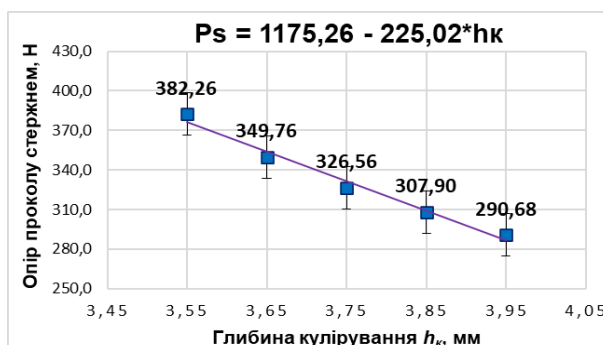
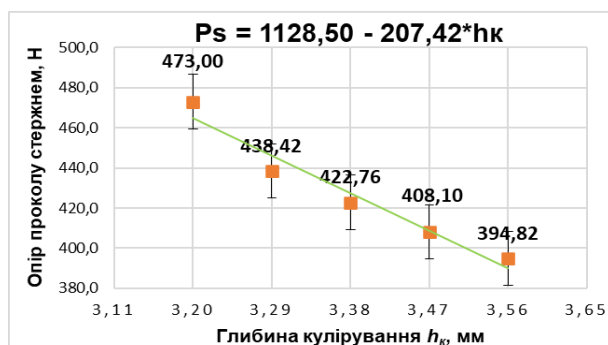


Рис. 9. Графіки залежності зусилля проколу стержнем від зміни щільності в'язання: з UHMWPE нитки: а) без платин ПВРК; б) з платинами РА; з рА нитки: в) без платин ПВРК; г) з платинами РА

Наведені на рис. 9 графіки наглядно ілюструють, що зі зменшенні щільності в'язання трикотажу зусилля проколу стержнем, яке витримують дослідні зразки трикотажу, незалежно від виду високоміцних ниток, наявності чи відсутності платин при формуванні петель спадає та описується лінійною залежністю. Це можна пояснити тим, що зменшення щільності в'язання призводить до збільшення наскрізної пористості петельної структури та зменшенню

кількості прямолінійних відрізків нитки в петлі, які опираються зусиллю проколу стержнем. Під впливом сили тиску опорної поверхні стержня на елементи петельної структури відбувається руйнування прямолінійних відрізків ниток в петлях до утворення наскрізного отвору, через що більш щільна структура трикотажного матеріалу забезпечує більшу величину опору проколу.

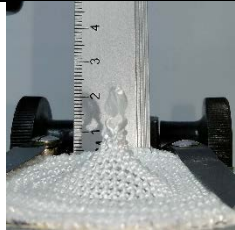
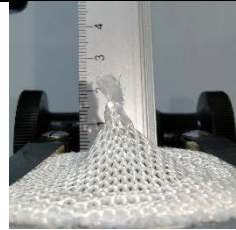
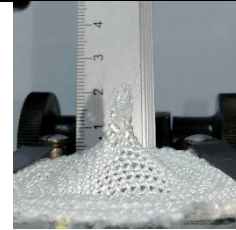

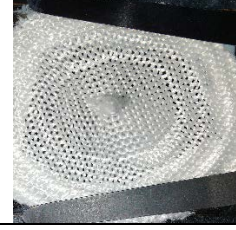
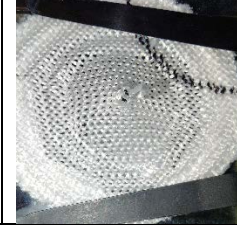
Зокрема, у випадку виготовлення трикотажу на плосков'язальному обладнанні без платин (типу ПВРК) при мінімальній глибині кулірування, зміна *UHMWPE* ниток на *pA* призводить до збільшення опору на 14,3% (рис. 9а,в) завдяки фізико-механічним характеристикам сировини та зигзагоподібній будові петель [1]. У разі виготовлення трикотажного матеріалу на обладнанні з платинами (типу PA) зміна *UHMWPE* ниток на *pA* призводить до збільшення опору проколу на 25,18% (рис. 9б,г). Слід також відзначити, що більшу стійкість до проколу демонструють зразки трикотажу, виготовлені на плоскофанговому обладнанні без використання платин (типу ПВРК), а саме: у разі використання *UHMWPE* нитки при порівнянні зразків найщільнішої структури на 19,18% (рис. 9а,б), у разі виготовлення трикотажу з *pA* нитки – на 13,3% (рис. 9в,г). Це пояснюється тим, що у разі вироблення трикотажу на плосков'язальному обладнанні без платин (типу ПВРК) завдяки забезпеченню зусилля відтягування полотна гребінкою з тягарцями є можливість одержання більш щільної структури. При цьому петлі мають видовжену форму і під дією зусилля проколу відбувається незначний перерозподіл нитки з платинних дуг у палички остовів петель та більш щільна структура матеріалу демонструє більший опір проколу. У разі виготовлення дослідних зразків на плосков'язальному обладнанні з платинами, де під дією платин фіксується стала величина між петлями в області платинних дуг, під впливом перфоруючого зусилля спочатку відбувається перерозподіл нитки з платинних дуг у палички остовів петель.

У ході досліджень опору трикотажного матеріалу проколу стержнем вивчено характер деформації та руйнування петельної структури під дією перфоруючого зусилля в залежності від виду високоміцних ниток та типу в'язального обладнання (табл. 5).


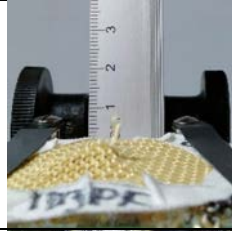
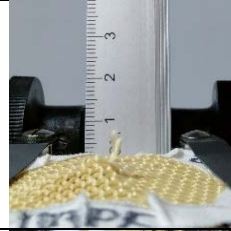
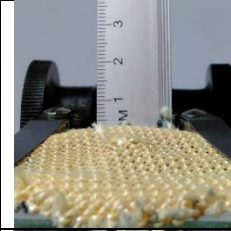
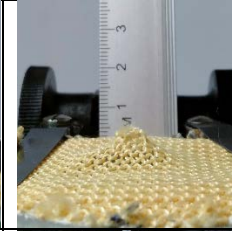




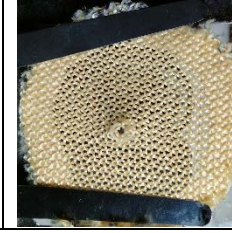
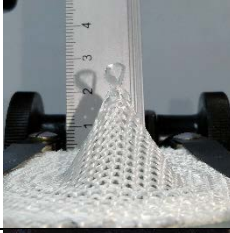
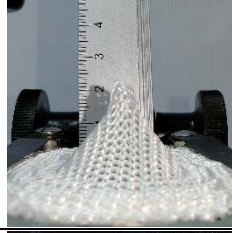
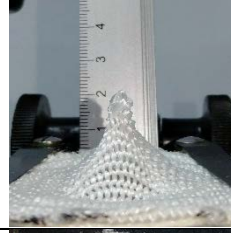
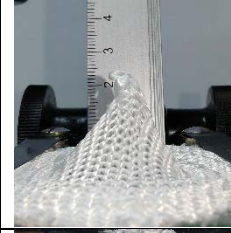
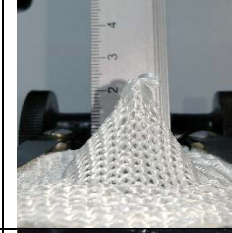

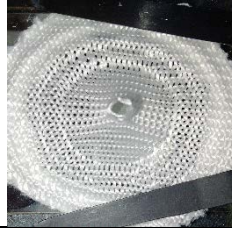
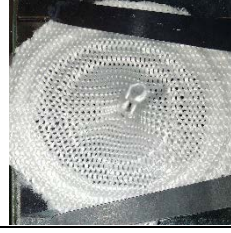

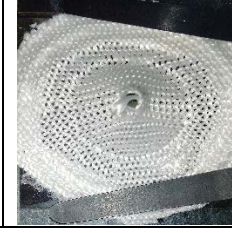

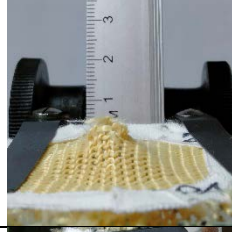
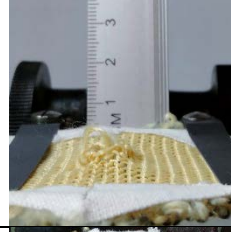
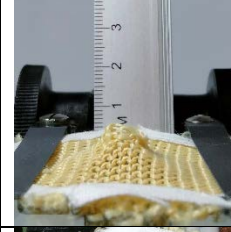
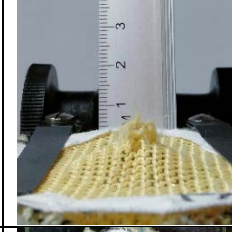

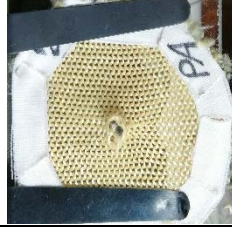


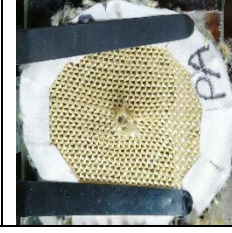
На підставі встановлених даних (табл. 4) побудовано графіки залежності величини деформації дослідних зразків під впливом перфоруючого зусилля стержня від щільності їх в'язання (рис. 10).

Таблиця 5

Характер деформації трикотажного матеріалу під дією зусилля проколу стержнем

Зразки, вироблені на обладнанні без платин типу ПВРК з <i>UHMWPE</i> нитки				
рівень глибини кулірування				
1	2	3	4	5
				
				

Продовження табл. 5

Зразки, вироблені на обладнанні без платин типу ПВРК з рА нитки				
Рівень глибини кулірування				
1	2	3	4	5
				
				
Зразки, вироблені на обладнанні з платинами типу РА з UHMWPE нитки				
Рівень глибини кулірування				
1	2	3	4	5
				
				
Зразки, вироблені на обладнанні з платинами типу РА з рА нитки				
Рівень глибини кулірування				
1	2	3	4	5
				
				

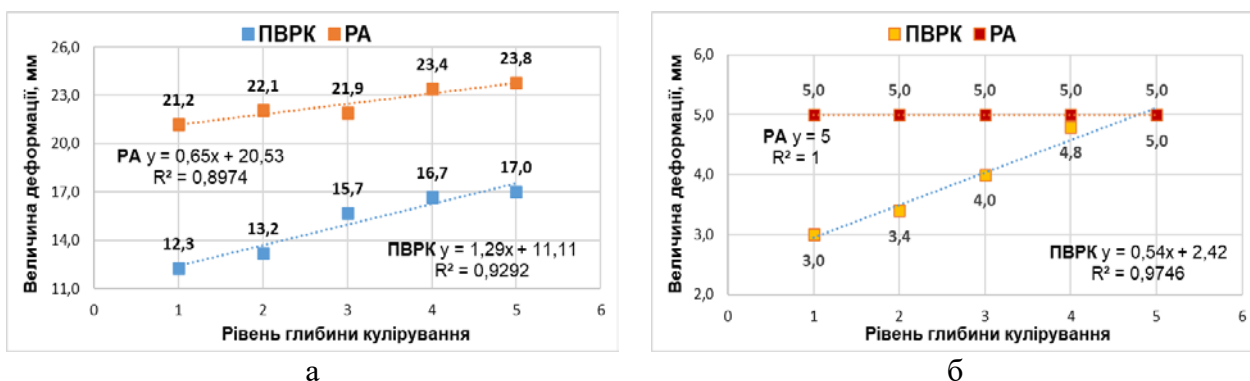


Рис. 10. Графіки залежності величини деформації зразків трикотажу під дією зусилля проколу стержем: а) з UHMWPE нитки; б) з рА нитки

Слід зазначити, що на величину деформації не має впливу щільність в'язання у разі вироблення трикотажного матеріалу з рА нитки на плосков'язальному обладнанні з платинами. Фізико-механічні характеристики UHMWPE ниток обумовлюють більшу величину деформації трикотажного матеріалу під впливом стержня. У разі використання UHMWPE ниток у наслідок перфоруючого зусилля стержня, що потрапив на прямолінійний відрізок нитки, в структурі трикотажного матеріалу відбувається його деформація та витягування нитки до моменту її руйнування. При цьому релаксація деформації петельної структури після завершення перфорування не спостерігається.

У випадку перфорування зразків з рА ниток, деформація структури трикотажного матеріалу не чітко виражена (3÷5мм), що пояснюється жорсткістю на згин даного виду сировини. Після проколу відбувається релаксація деформації нитки в петлях трикотажного матеріалу. Незначне зростання величини деформації (до 2мм) під впливом перфоруючого зусилля стержня зі зменшенням щільності в'язання можна пояснити зростанням наскрізної пористості трикотажного матеріалу та зменшенням зигзагоподібної будови петель у петельних стовпчиках [1].

Висновок: У ході досліджень встановлено характер впливу зміни глибини кулірування на показники опору трикотажного матеріалу проколу та продавлюванню кулькою. Одержані математичні моделі дозволяють на етапі проектування розрахувати показники стійкості до проколу та продавлювання кулькою у відповідності до обраних параметрів в'язання: тип плосков'язального обладнання, виду високоміцних ниток та величина глибини кулірування.

Через обмежені характеристики розривної машини КТ-7010AZ дослідні зразки трикотажного матеріалу, виготовлені з UHMWPE ниток на обладнанні без платин типу ПВРК не досягли моменту руйнування петельної структури внаслідок продавлювання кулькою.

При проколі стержем, збільшення глибини кулірування призводить до зменшення стійкості до проколу, що обумовлено зменшенням кількості прямолінійних відрізків нитки, що чинить опір проколу.

Використання високоміцних ниток дозволяє досягнути максимального 5 рівня стійкості [13] трикотажного матеріалу до проколу незалежно від його щільності в'язання. На в'язальному обладнанні без використання платин типу ПВРК можна досягнути більш щільної будови трикотажного матеріалу та відповідно вищого рівня стійкості до проколу стержем та продавлювання кулькою.

References

1. Dmytryk, O. M., Halavska, L. Ye. (2023). Vplyv tekhnolohichnykh faktoriv oderzhannia trykotazhu z vysokomitsnykh nytok na formu petel ta parametry yoho

Література

1. Дмитрик О. М., Галавська Л. Є. Вплив технологічних факторів одержання трикотажу з високоміцних ниток на форму

- struktury. [Influence of technological factors of producing knitted material from high-tension threads on the formation of loops and structure parameters]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, № 5 (16), P. 76–85 [in Ukrainian].
2. Dmytryk, O. M., Halavska, L. Ye. (2024). Vplyv typu ploskoviazalnoho obladnannia na rozryvalni kharakterystyky trykotazhnoho materialu z vysokomitsnykh nytok. [Study of the influence of flat knitting equipment type on the breaking load and elongation of knitted fabric made from high-strength threads]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, № 2 (19), P. 60–76 [in Ukrainian].
3. Deitzel, J. M., McDaniel, P., Gillespie, J. W. (2017). High-performance polyethylene fibers. *Structure and Properties of High-Performance Fibers*. P. 167–185. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100550-7.00007-3>.
4. Zhang, J. M., Mousavi, Z., Soykeabkaew, N., Smith, P., Nishino, T., Peijs, T. (2010). All-Aramid Composites by Partial Fiber Dissolution. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2(3), P. 919–926. <https://doi.org/10.1021/am900859c>.
5. Engr. Reashad Bin Kabir, Engr. Nasrin Ferdous (2012). Kevlar-The Super Tough Fiber. *International Journal of Textile Science*, Vol. 1, No. 6, P. 78–83. DOI: 10.5923/j.textile.20120106.04.
6. Alpyildiz, T., Rochery, M., Kurbak, A., Flambard, X. (2010). Stab and cut resistance of knitted structures: a comparative study. *Textile Research Journal*, No. 81 (2), P. 205–214. DOI:10.1177/0040517510383617
7. Krauledaitė, J., Ancutienė, K., Krauledas, S., Urbelis, V., Sacevičienė, V. (2022). Investigation of the influence of high molecular weight polyethylene and basalt content used in three-dimensional weft-knitted fabrics on the mechanical risks. *Textile Research Journal*, Vol. 92 (23–24), P. 4709–4721. DOI:10.1177/00405175221109633.
8. Bobrova, S. Yu., Dmytryk, O. M., Halavska, L. Ye. (2020). Stiikist trykotazhu z vysokomitsnykh polietylenovykh nytok do dii rozdyraiuchoho zusyillia ta prokolu [Resistance of ultra-strong polyethylene yarn knitwear to tearing and puncture]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu = Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, № 4 (75), P. 103–109 [in Ukrainian].
9. Kulyk, A., Bobrova, S., Halavska, L. (2019). Rozrobka trykotazhu pidvyshchenoi mitsnosti ta doslidzhennia yoho mekhanichnykh kharakterystyk [Development of knitted fabric with increased strength and research of its петель та параметри його структури. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 5 (16). С. 76–85.
2. Дмитрик О. М. Галавська Л. Є. Вплив типу плосков'язального обладнання на розривальні характеристики трикотажного матеріалу з високоміцних ниток. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 2 (19). С. 60–76.
3. Deitzel J. M., McDaniel P., Gillespie J. W. High-performance polyethylene fibers. *Structure and Properties of High-Performance Fibers*. 2017. P. 167–185. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100550-7.00007-3>.
4. Zhang J. M., Mousavi Z., Soykeabkaew N., Smith P., Nishino T., Peijs T. All-Aramid Composites by Partial Fiber Dissolution. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010. 2(3). P. 919–926. <https://doi.org/10.1021/am900859c>.
5. Engr. Reashad Bin Kabir, Engr. Nasrin Ferdous. Kevlar-The Super Tough Fiber. *International Journal of Textile Science*. 2012. Vol. 1, No. 6. P. 78–83. DOI: 10.5923/j.textile.20120106.04.
6. Alpyildiz T., Rochery M., Kurbak A., Flambard X. Stab and cut resistance of knitted structures: a comparative study. *Textile Research Journal*. 2010. No. 81 (2). P. 205–214. DOI: 10.1177/0040517510383617.
7. Krauledaitė J., Ancutienė K., Krauledas S., Urbelis V., Sacevičienė V. Investigation of the influence of high molecular weight polyethylene and basalt content used in three-dimensional weft-knitted fabrics on the mechanical risks. *Textile Research Journal*. 2022. Vol. 92 (23–24). P. 4709–4721. DOI: 10.1177/00405175221109633.
8. Боброва С. Ю., Дмитрик О. М., Галавська Л. Є. Стійкість трикотажу з високоміцних поліетиленових ниток до дії роздираючого зусилля та проколу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2020. № 4 (75). С. 103–109.
9. Кулик А. А., Боброва С. Ю., Галавська Л. Є. Розробка трикотажу підвищеної міцності та дослідження його механічних характеристик. *Міжнародний науковий*

- mechanical characteristics]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "OSVITA I NAUKA" = International scientific journal "EDUCATION AND SCIENCE"*, Vol. 1 (26), P. 40–47 [in Ukrainian].
10. Sun, Y., Xu, W., Wei, W., Ma, P., Xia, F. (2021). Stab-resistance of auxetic weft-knitted fabric with Kevlar fibers at quasi-static loading. *Journal of Industrial Textiles*, No. 50 (9), P. 1384–1396. DOI: 10.1177/1528083719865044.
11. Halavska, L., Kravchuk, M., Mikucioniene, D. (2023). Research of knitted fabric materials on the resistance to puncture and ball pressure. *Zbirnyk tez dopovidei VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii tekstyl'nykh ta feshn-tekhnologii KyivTex&Fashion* (Kyiv, 19.10.2023). Kyiv: KNUTD. P. 148–150.
12. Zelalem, E., Gideon, R. K. (2020). The Study of Mechanical Properties of Knitted Fabrics: Tear and Bursting Strength. *J Adv Res Poly Text Engi*, No. 1 (1), P. 34–40.
13. EN 388-2019 Systema standartiv okhorony pratsi. Zasoby indyvidualnoho zakhystu ruk. Zakhysni rukavychky vid mekhanichnykh poshkodzhen. Tekhnichni vymohy. Metody vyprobuvan [EN 388-2019 Occupational safety standards system. Personal protective means of hands. Protective gloves against mechanical risks. Technical requirements. Test methods]. Data aktualizatsii: 01.01.2021 [in Ukrainian].
14. GOST 8847-85 Knitted fabrics. Methods for determination of breaking characteristics and extensibility under loads less than breaking loads. Не діє в Україні.
15. Klochko, O. (2006). Doslidzhennia u trykotazhnii promyslovosti: navch. posibnyk dlia stud. vyshchykh navch. zakl. [Research in the knitted industry: study guide]. Kyiv: KNUTD. 190 p. [in Ukrainian].
16. PN-EN ISO 3379:2015. Leather – Determination of Distension and Strength of Surface (Ball Burst Method).
- журнал "ОСВІТА І НАУКА". 2019. Вип. 1 (26). С. 40-47.
10. Sun Y., Xu W., Wei W., Ma P., Xia F. Stab-resistance of auxetic weft-knitted fabric with Kevlar fibers at quasi-static loading. *Journal of Industrial Textiles*. 2021. No. 50 (9). P. 1384–1396. DOI: 10.1177/1528083719865044.
11. Halavska L., Kravchuk M., Mikucioniene D. Research of knitted fabric materials on the resistance to puncture and ball pressure. *Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції текстильних та фешн-технологій KyivTex&Fashion* (Київ, 19.10.2023). Київ: КНУТД, 2023. С. 148–150.
12. Zelalem E., Gideon R. K. The Study of Mechanical Properties of Knitted Fabrics: Tear and Bursting Strength. *J Adv Res Poly Text Engi*. 2020. No. 1 (1). P. 34–40.
13. EN 388-2019 Система стандартів охорони праці. Засоби індивідуального захисту рук. Захисні рукавички від механічних пошкоджень. Технічні вимоги. Методи випробувань. Дата актуалізації: 01.01.2021.
14. GOST 8847-85 Knitted fabrics. Methods for determination of breaking characteristics and extensibility under loads less than breaking loads. Не діє в Україні.
15. Клочко О. І. Дослідження у трикотажній промисловості: навч. посібник для студ. вищих навч. закл. К.: КНУТД, 2006. 190 с.
16. PN-EN ISO 3379:2015. Leather – Determination of Distension and Strength of Surface (Ball Burst Method).

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

KHARCHENKO YULIA

Candidate of Technical Science,
Testing Laboratory of Analytical Research "Textile-TEST",
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-9738-087X>
E-mail: Harchenko.jm@kntud.com.ua

¹DMYTRYK O. M., ¹HALAVSKA L. Ye., ²KHARCHENKO Yu. M.

¹Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

²Testing Laboratory of Analytical Research "Textile-TEST", Kyiv, Ukraine

THE INFLUENCE OF A SPECIFIC FLAT KNITTING EQUIPMENT ON THE RESISTANCE OF KNITTED MATERIALS MADE OF HIGH-STRENGTH YARNS TO MECHANICAL DAMAGE (PIERCING WITH A ROD AND PRESSING WITH A BALL)

Purpose. To study the influence of peculiarities of manufacturing with the use of flat knitting equipment of two types (with and without sinkers) of knitted material of the plain interloping made from high-strength yarns on its resistance to mechanical damage (particularly, piercing with a rod and pressing with a ball).

Methodology. To determine specifics of the resistance of knitted materials to mechanical damage such as piercing with a rod and pressing with a ball, actual standardized research methods were used. The study of the resistance to piercing with a rod and pressing with a ball was carried out using an electronic tensile tester KT-7010AZ. An active one-factor experiment was conducted to determine the influence of the knitting density and the type of flat-knitting equipment on the characteristics of knitted fabrics' resistance to mechanical damage in accordance with the selected type of flat-knitting equipment. The method of linear regression analysis was used to process the experimental data and construct graphs and diagrams of mechanical effects in the traditional planning of an active one-factor experiment implementing the tools of Microsoft Excel.

The results. In the course of the research, it was found out that the resistance to piercing with rod and pressing with a ball of knitted fabrics made of high-strength yarns is influenced by the type of yarns chosen, as well as by the type of flat-knitting equipment, the jersey structure depth and knitting density. At the same time, knitted fabrics produced with the use of flat-knitting equipment without platens demonstrate a higher level of resistance to the studied indicators of mechanical damage. In particular, it was not possible to establish the tensile strength of a knitted material produced from high molecular weight polyethylene yarns to resist the ball punching, since the pressure exceeded 5000N, with the measurement scale of the tensile machine being 5000N. The nature of deformation of test samples under the influence of the force caused by the rod piercing and ball pressing was analyzed. The processes of piercing and pressing are preceded by the tear-off of a single thread in the knitted material structure. However, in the case of para-aramid yarns, the loops are immediately released as a result of the yarn rupture and damage to the structure wholeness.

Scientific novelty. It has been established that the value of resistance to piercing with a rod and pressing with a ball of knitted fabric is influenced not only by the selected type of high-strength yarns and knitting density, but also by the presence of platens in the looping process. The nature of influence of a flat-knitting equipment type (with and without sinkers) and the knitting density of knitted materials of a plain weave made from high-molecular-weight polyethylene and para-aramid yarns on the value of resistance to mechanical damages was as well specified.

Practical significance. The mathematical dependencies obtained during the implementation of an active single-factor experiment of the research allow us to calculate the value of resistance to piercing with a rod and pressing with a ball and to select rational manufacturing parameters (type of high-strength yarns, type of flat knitting equipment, depth of jersey structure) in accordance with the required level of resistance of knitted fabrics to the studied indicators of mechanical damage, and to determine the rational parameters of manufacturing knitted fabrics.

Keywords: para-aramid thread; ultra-high molecular weight polyethylene thread; durable knitted materials; plain interloping; piercing with a rod; pressing with a ball; flat knitting equipment.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.8>

УДК 678.7:
661.1:615.4

¹ВАХІТОВ Р. А., ²КАЛАФАТ К. В., ²ТАРАН Н. А.,
^{1,2}БЕССАРАБОВ В. І., ²РАЄНКО Г. Ф., ²ШОЛОГОН В. І.,
^{2,3}КОРОТКИХ М. 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

³ Інститут органічної хімії НАН України, Київ, Україна

ЕТЕРИ ЦЕЛЮЛОЗИ ЯК МОДИФІКАТОРИ РЕОЛОГІЇ ВОГНЕЗАХИСНИХ ФАРБ РЕАКТИВНОГО ТИПУ

Мета. Дослідження впливу етерів целюлози на реологічні властивості інтумесцентної вогнезахисної фарби та визначення структур загусників, які максимально удосконалюють експлуатаційні властивості лакофарбового матеріалу.

Методика. За модельну інтумесцентну систему обрано вогнезахисне покриття реактивного типу, яке містить у своєму складі поліфосфат амонію, меламін, пентаеритрит, діоксид титану та полімер. У якості полімерної складової вивчали водні дисперсії співполімерів вінілацетату від різних виробників. Як целюлозні загусники використовували гідроксіетил- та гідроксипропіл етери целюлози, які визнані найбільш вдалим модифікаторами реології фарб на основі вінілацетатних полімерів. В'язкість вогнезахисних композицій вимірювали на віскозиметрі Брукфілда, розрахунок реологічних параметрів здійснювали за рівнянням Кассона.

Результати. В дослідженні визначено вплив природи целюлозного загусника та полімеру на реологічні параметри, відповідальні за зберігання та нанесення лакофарбового матеріалу. Встановлено, що структура етеру целюлози має значення при регулюванні в'язкості досліджених інтумесцентних композицій. Найбільші значення в'язкості демонструє високомолекулярна гідроксіетилметил целюлоза (Vertocoll EM 7000 FQ). Гідроксипропіл метил целюлози є менш ефективними загусниками інтумесцентних фарб складу поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит/полімер. Природа полімерної складової, у свою чергу, майже не впливає на в'язкість досліджених композицій, що не містять загусника чи містять Vertocoll EM 7000 FQ. Для вивчених полімерних складових інтумесцентних композицій спостерігаються практично ідентичні реологічні профілі. Розрахунок реологічних параметрів – в'язкості при високих швидкостях зсуву, напруги зсуву, межі текучості із залученням рівняння Кассона дозволяє зробити висновок, що загущення вогнезахисних фарб інтумесцентного типу етерами целюлози є ефективним для запобігання седиментації при зберіганні та майже не впливає на збільшення товщини шару фарби, що можливо нанести за один прохід. Шляхом випробувань вогнезахисної ефективності покриттів в умовах міні-печі показано, що присутність етерів целюлози не зменшує вогнестійкість металевих пластин.

Наукова новизна. Вперше визначено вплив структури целюлозних загусників на реологічні параметри вогнезахисної фарби інтумесцентного типу, відповідальні за зберігання та нанесення.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють визначити доцільні структури етерів целюлози, які можуть застосовуватися у промисловому виробництві інтумесцентних фарб.

Ключові слова: вогнезахист; покриття реактивного типу; в'язкість вогнезахисних фарб; етери целюлози; реологічний профіль.

Вступ. Вогнезахисні реактивні (інтумесцентні, такі, що спучуються) покриття для металевих конструкцій є найбільш поширеними серед засобів вогнезахисту, що застосовуються у світовій практиці пожежної безпеки [1, 2]. За даними аналітичних досліджень світового ринку вогнезахисту з 2020 по 2027 роки для інтумесцентних покриттів прогнозується річний темп зростання на 5,2% [3]. Така ситуація пояснюється, перш за все, тим, що саме тонкошарові покриття не порушують архітектурні форми та дизайнерські проекти, які спираються на естетичні можливості та переваги сталі у будівництві [1, 4]. Відмічається [3, 5], що в європейських країнах за останні 20 років спостерігається зростання застосування

покриттів реактивного типу з 50 до 80%. Така ситуація є наслідком систематичних та направлених наукових досліджень з питань удосконалення властивостей та ефективності інтумесцентного вогнезахисту [6, 7]. Більшість реактивних фарб, які випускаються промислово, містять у своєму складі обов'язкову тріаду компонентів (поліфосфат амонію (APP), меламін (MA), пентаеритрит (PE)), пігмент (діоксид титану TiO_2), полімер, антипірени, наповнювачі, реологічні домішки тощо [8, 9]. Збалансований склад забезпечує ефективність вогнезахисної дії, універсальність, легкість та швидкість нанесення, естетичні та експлуатаційні характеристики покриттів реактивного типу.

Розвиток інновацій та наукових розробок у галузі інтумесцентних технологій вогнезахисту обумовив за останні 10 років зростання показника межі вогнестійкості сталевих конструкцій R з 90 до 180 хв. Звичайно це призводить до збільшення товщини реактивного покриття, яка може забезпечити відповідне значення R. Аналіз технічної документації покриттів, які присутні на ринку вогнезахисту України, демонструє, що в середньому для забезпечення межі вогнестійкості сталевій конструкції R180 товщина вогнезахисного покриття має бути не меншою за 8–10 мм. Для отримання такої товщини необхідно нанести не менше 15 шарів фарби, бо згідно з технічними рекомендаціями виробників, товщина мокрого шару не може перевищувати 0,7–1,2 мм. Багаторазове нанесення шарів для досягнення регламентованої товщини реактивного покриття значно підвищує вартість вогнезахисної обробки об'єкта будівництва, а також робить металеве будівництво економічно невиправданим і надає перевагу одноманітним бетонним конструктивам [10–12]. Одним із наукових підходів збільшення товщини покриття, яке можливо наносити за один прохід без супутніх дефектів (стікання та провисання фарби, підтрьоків, раковин, здуттів та відшарування від поверхні) є удосконалення реологічних властивостей фарби. В першу чергу це стосується пошуку систем загущення лакофарбового матеріалу [13, 14] для підвищення тиксотропних властивостей та збільшення в'язкості в області високих зсувів, які спостерігаються при нанесенні фарби механізованими методами.

Постановка завдання. У водорозчинних полімерних композиціях реологія є ключовою властивістю для зберігання, ефективного виробництва, транспортування та нанесення фарб. Відповідний контроль реологічних властивостей (в'язкості, текучості, седиментації, стікання та провисання) досягається шляхом правильного вибору загусника чи системи загусників лакофарбового продукту. Інформація про методи загущення водно-дисперсійних вогнезахисних композицій в науковій літературі відсутня. Дані, отримані з патентного пошуку, дозволяють визначити в наведених рецептурах реактивних засобів вогнезахисту лише одну речовину, відповідну за реологічну поведінку. Це целюлозні загусники (естери целюлози), ефективність яких полягає у здатності «знерухомлювати» воду та запобігати седиментації твердих компонентів інтумесцентної системи.

Метою дослідження є дослідження впливу етерів целюлози на реологічні властивості інтумесцентної вогнезахисної фарби та визначення структур загусників, які максимально удосконалюють експлуатаційні властивості лакофарбового матеріалу.

Матеріали та обладнання. Для приготування фарб застосовували поліфосфат амонію Exolit AP 422 (Clariant, Німеччина), пентаеритрит Charmor PM40 від Perstorp Holding AB (Швеція), меламін виробництва Borealis Agrolinz Melamine GmbH (Австрія). Як пігмент використовували діоксид титану марки Ti-Pure R-902 (DuPont, США). Полімерні дисперсії співполімерів вінілацетату різних виробників представлені у табл. 1.

Вибір полімерів для досліджень продиктований, перш за все, тим, що саме ці продукти найчастіше використовуються для виготовлення європейських засобів реактивного вогнезахисту. На жаль, виробники вінілацетатних дисперсій не розкривають відповідні структурні формули полімеру, склад стабілізаційних систем, співвідношення мономерів у

полімерних ланцюгах. Властивості вихідних полімерних дисперсій за даними відкритої та доступної технічної документації наведені у табл. 2.

Таблиця 1

Перелік полімерних компонентів інтумесцентних систем

Хімічна структура співполімеру	Скорочена назва	Виробник
Вінілацетат-етилен Vinnapas® EZ 3010	EZ 3010	Wacker, США
Вінілацетат-етилен Dairen DA 101	DA 101	Dairen Chemical Corporation, Китай
Вінілацетат-етилен-вініловий етер Vinnapas® EZ 3112	EZ 3112	Wacker, США
Вінілацетат-етилен-вінілверсатат Exodisp V2209	V2209	EOC Group, Бельгія

Таблиця 2

Властивості вінілацетатних полімерів

Скорочена назва	Вміст нелетких речовин, %	В'язкість, 25 °С, Па·с	pH
EZ 3010	54–56	2,7–5,9	4,5–5,5
DA 101	54–56	1,5–2,5	4,5–6,5
EZ 3112	49–51	1,8–4,0	4,5–5,5
V2209	54–56	3,4–4,5	3,5–4,5

Незважаючи на різний мономерний склад та деякі розбіжності у характеристиках полімерних компонентів (табл. 2), ІЧ-спектри, що відповідають дослідженим співполімерам, є майже ідентичними та такими, що не дозволяють визначити суттєву різницю їх хімічних структур залученим спектральним методом (рис. 1).



Рис. 1. ІЧ-спектри плівок вінілацетатних співполімерів

Целюлозні загусники представлені товарними зразками етерів целюлози та наведені у табл. 3. Були досліджені найбільш поширені у виробництві водно-дисперсійних фарб целюлозні загусники: гідроксіетилметил целюлоза (HEMC-1 та HEMC-2, табл. 3) та гідроксипропілметил целюлоза (HPMC-1 та HPMC-2).

Таблиця 3

Етери целюлози, що використані в дослідженні¹⁾

Торговельна марка	Назва	pH	В'язкість при 20 °С, 1% розчин, Па с
Bermocoll M 30, HEMC-1	Гідроксіетилметил целюлоза	7,0–8,0	1,5–2,5
Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	Гідроксіетилметил целюлоза	5,0–7,0	3,5–5,5
Wekcelo MAT 2024, HPMC-1	Гідроксипропілметил целюлоза	5,0–8,0	3,5–5,0
Mecellose FMC 8821, HPMC-2	Гідроксипропілметил целюлоза	7,0–10,0	4,5–5,5

¹⁾За даними технічної документації виробника продукту.

Для приготування інтумесцентних композицій в лабораторний дисольвер з об'ємом робочої чаші 1 дм³ поміщали 200 г води, необхідну кількість целюлозного загусника та гідроксид натрію для регулювання pH в інтервалі 8–9. Суміш перемішували протягом 30 хв до утворення прозорого гелю. Додавали компоненти інтумесцентної системи: 330 г поліфосфату амонію (APP), 110 г пентаеритриту (PE), 110 г меламіну (MA), 90 г оксиду титану (TiO₂). Суміш перемішували протягом 30 хв. при швидкості фрези 900–1000 об/хв. До отриманої пасти додавали 200 г відповідної водної дисперсії полімеру (табл. 1) та перемішували при швидкості фрези 500–600 об/хв. протягом 30 хв. Готову інтумесцентну фарбу зберігали у герметичній ємності.

Дослідження впливу етерів целюлози на реологічні властивості інтумесцентних композицій здійснювали на моделях вогнезахисних водних фарб, позначення яких представлені у табл. 4. За виключенням компонентів, зазначених у табл. 4, досліджені склади IFR мали спільну інтумесцентну основу APP/MA/PE/TiO₂/вода у співвідношенні 3:1,1:1,1:0,9:2, до якої додавали 2 ваг. част. відповідного полімеру. Вміст целюлозних загусників був незмінним – 1% від маси інтумесцентної фарби.

Таблиця 4

Позначення вогнезахисних фарб з різними целюлозними загусниками

Назва фарби	Целюлозний загусник	Полімер
IFR(EZ 3010)	-	EZ 3010
IFR(DA 101)	-	DA 101
IFR(EZ 3112)	-	EZ 3112
IFR(V 2209)	-	V 2209
IFR1	Bermocoll M 30, HEMC-1	EZ 3010
IFR2	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	EZ 3010
IFR3	Wekcelo MAT 2024, HPMC-1	EZ 3010
IFR4	Mecellose FMC 8821, HPMC-2	EZ 3010
IFR5	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	DA 101
IFR6	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	EZ 3112
IFR7	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	V 2209

Дослідження реологічних властивостей інтумесцентних композицій здійснювали на ротаційному реометрі Brookfield DV-III. Вогнезахисну ефективність IFR-композицій, представлених у табл. 4, визначали в умовах стандартної пожежі у міні-печі, як описано в [15].

Результати дослідження. В'язкість (η , Па с) інтумесцентних композицій IFR та IFR1 – IFR7 (табл. 4) вимірювали на віскозиметрі Brookfield DV-III, який забезпечує максимальну швидкість обертів шпинделю 250 об/хв. (швидкість зсуву $\gamma = 52,25 \text{ c}^{-1}$).

Вплив структури целюлозних загусників на реологію інтумесцентної фарби вивчали на прикладі композицій, що містять полімерну дисперсію вінілацетат-етилен (Vinnapas® EZ 3010) IFR – IFR4 (табл. 4) у відсутності (IFR (EZ 3010), табл. 4) та присутності 1% целюлозного загусника (табл. 3). На рис. 2 представлені значення динамічної в'язкості композицій IFR (EZ 3010) та IFR1 – IFR4, що були визначені із застосуванням шпинделю N6 в діапазоні швидкостей обертів шпинделю 10 c^{-1} – 250 c^{-1} при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$ в ємності 1 дм^3 з діаметром 120 мм. Маса фарби при вимірюваннях в'язкості завжди дорівнювала $(1000 \pm 100) \text{ г}$.

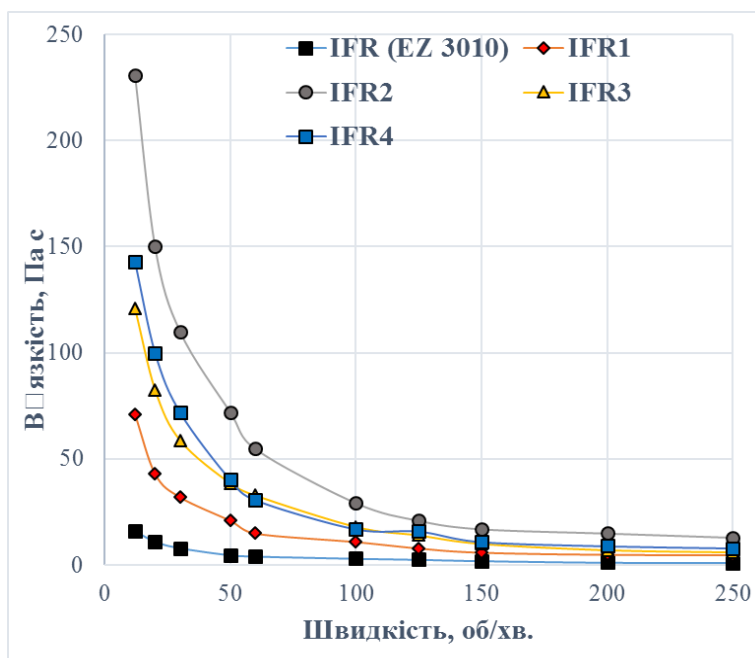


Рис. 2. Значення динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних композицій IFR (EZ 3010) та IFR1 – IFR4

Продемонстрована на рис. 2 залежність динамічної в'язкості композицій IFR (EZ 3010) та IFR1 – IFR4 від швидкості обертів шпинделю свідчить, мінімум, про такі безсумнівні факти:

- досліджені фарби є неньютонівськими рідинами та характеризуються псевдопластичною течією: в'язкість суттєво зменшується зі збільшенням швидкості зсуву;
- значення динамічної в'язкості є чутливим до структури целюлозного загусника особливо в інтервалі низького зсуву (до 150 об/хв.);
- додавання ефективного целюлозного загусника в вогнезахисну фарбу складу APP/MA/PE/TiO₂/полімер майже у 30 разів підвищує в'язкість вихідної фарби IFR (EZ 3010).

В табл. 5 наведені значення $\Delta\eta$ – відношення значень в'язкості IFR2 та IFR1 у присутності НЕМС-2 (ефективне загущення) та НЕМС-1 (незначне загущення) до значення в'язкості IFR (EZ 3010) без загусника (рис. 2) протягом зростання швидкості зсуву.

Вінілацетатні полімери, залучені у цьому дослідженні (табл. 2), мають ідентичні структури (рис. 1), а їх дисперсії у воді характеризуються близькими значеннями рН (4,5–5,5). Тим не менш, розчини полімерних дисперсій у присутності целюлозного загусника з високим

ступенем загушення НЕМС-2 (1% від маси полімеру) демонструють різницю реологічних профілів в інтервалі 10-250 об/хв. (рис. 3).

Загальною тенденцією за даними рис. 3 є той факт, що полімери вінілацетат-етилен (EZ 3010, DA 101) демонструють більшу схильність до загушення, ніж їх гідрофобні аналоги EZ 3112 та V2209.

Таблиця 5

Відношення значень в'язкості IFR2 та IFR1 до значень в'язкості IFR (EZ 3010) ($\Delta\eta$) в залежності від швидкості обертів шпинделю

Швидкість, об/хв.	10–30	50–100	60–100	120–250
$\Delta\eta$ для IFR2	24–29	15–22	15–21	11–12
$\Delta\eta$ для IFR1	7–8	5–6	5	5–6

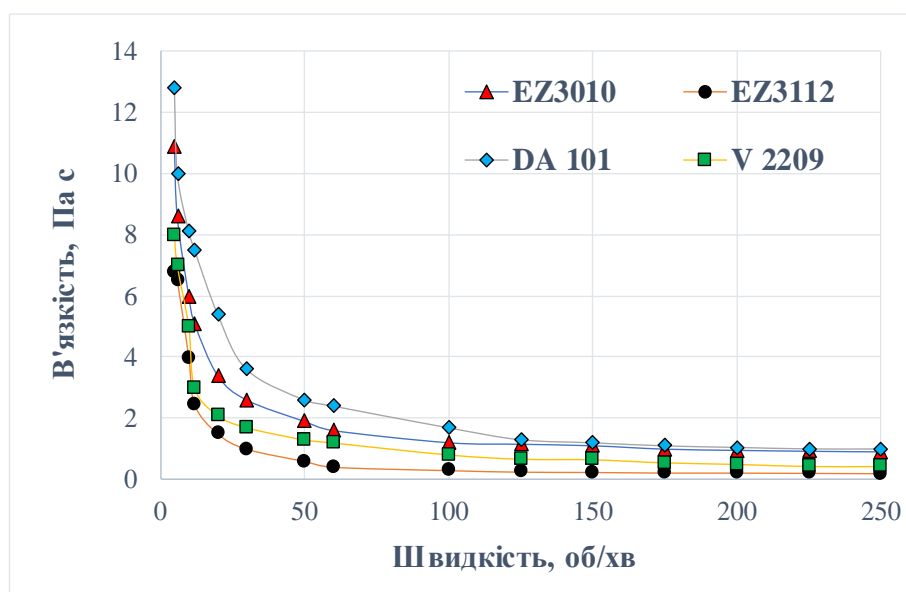


Рис. 3. Значення динамічної в'язкості полімерних дисперсій у присутності Vermocoll EM 7000 FQ

Вплив полімеру на в'язкість інтумесцентної фарби IFR у відсутності целюлозного загусника продемонстровано на рис. 4а. За представленими даними слід констатувати невелику різницю визначених значень в'язкості: 14–16 Па·с (10 об/хв.), 4–6 Па·с (50 об/хв.), 1–2 Па·с (200 об/хв.). Очікувано, що структура полімеру не впливає й на в'язкість фарб IFR2 та IFR5-IFR7, загушених НЕМС-2 (рис. 4б).

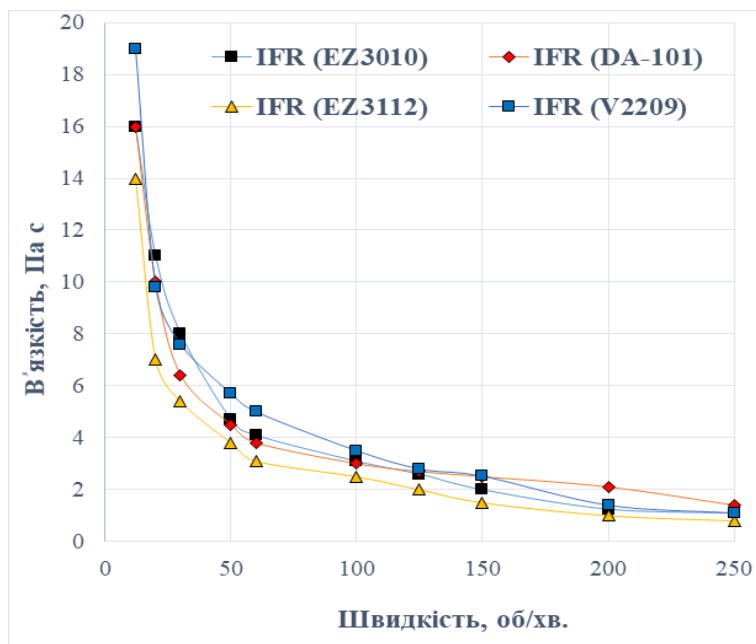
Така ситуація пояснюється високим наповненням композицій IFR нелеткими речовинами (70%), серед яких частка полімерного сполучного складає лише 10%. В той же час, механізм загушення естерами целюлози полягає у зв'язуванні води IFR, якої в досліджуваних композиціях приблизно однакова кількість – 30%. Цей факт обумовлює залежність в'язкості такої складної багатокомпонентної системи лише від ефективності загусника. В свою чергу, мірою ефективності етеру целюлози є його молекулярна маса, що, наприклад, обумовлює в'язкість 1% розчину (табл. 3).

Реологія лакофарбового матеріалу визначає умови та час зберігання, товщину нанесення і поведінку шару покриття під час його формування. Як основні реологічні параметри фарби слід розглядати:

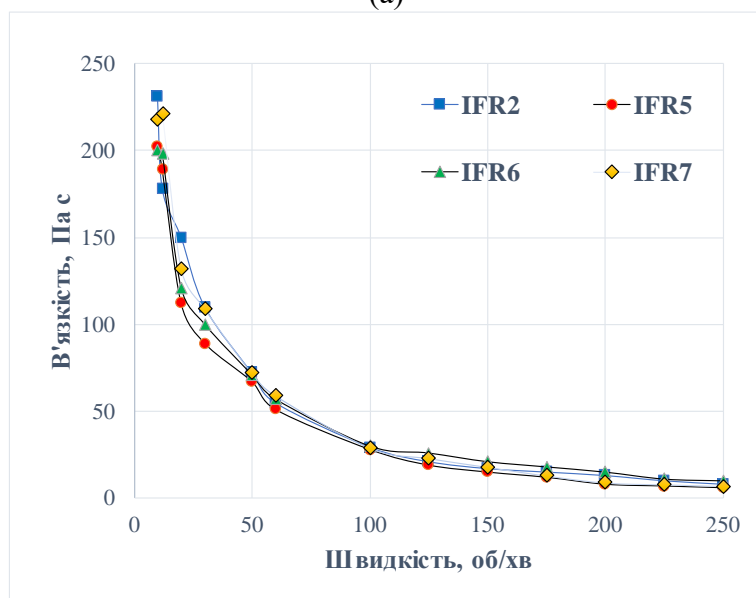
- η_0 (Па·с) – в'язкість системи у стані спокою (зберігання продукту);
- η (Па·с) – в'язкість при певній швидкості зсуву (нанесення, виробництво);
- η_∞ (Па·с) – в'язкість при високих швидкостях зсуву (нанесення);

- γ (с^{-1}) – швидкість зсуву;
- τ (Па) – напруга зсуву;
- τ_0 (Па) – межа текучості.

Однак не існує єдиного розуміння, як знання фундаментальних реологічних властивостей можна використовувати для контролю конкретних властивостей реального продукту. Тому застосування математичних кореляційних моделей, що описують співзалежність реологічних характеристик матеріалу, дають можливість накопичувати теоретичний матеріал для формування уніфікованого підходу до налаштування загального балансу реології фарби.



(а)



(б)

Рис. 4. Значення динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних без загусника (а) та композицій IFR2, IFR5– IFR7 (б)

В цьому дослідженні для прогнозування параметрів реології IFR-систем в широкому інтервалі швидкості зсуву пропонується використання рівняння Кассона [15]:

$$\eta^{1/2} = \eta_{\infty}^{1/2} + \tau_0^{1/2}/\gamma^{1/2}. \quad (1)$$

Із застосуванням рівняння (1) було визначено значення межі текучості τ_0 ($\gamma \rightarrow 0$) та в'язкість η_{∞} , що визначається на приладах ІСІ в інтервалі високих швидкостей зсуву. В табл. 6 наведені реологічні характеристики вогнезахисних фарб IFR(EZ 3010)-IFR7, які були отримані як результат лінеаризації значень « $\eta^{1/2}$ від $\gamma^{-1/2}$ » (експериментальні дані рис. 2 та рис. 4). За значення η_0 приймали експериментально виміряну в'язкість при швидкості зсуву $\gamma = 1,045 \text{ c}^{-1}$. Приклад залежності в координатах « $\eta^{1/2}$ від $\gamma^{-1/2}$ » наведено на рис. 5.

Таблиця 6

Показники реології фарб реактивного типу

Фарба	τ_0 , Па	η_{∞} , Па·с	r	η_0 , Па·с
IFR (EZ 3010)	37,2	0,096	0,993	32
IFR 1	146	0,136	0,997	84
IFR 2	605	0,103	0,990	205
IFR 3	289	0,152	0,987	124
IFR 4	296	0,160	0,987	142
IFR 5	529	0,123	0,972	176
IFR 6	552	0,122	0,971	215
IFR 7	530	0,101	0,970	252

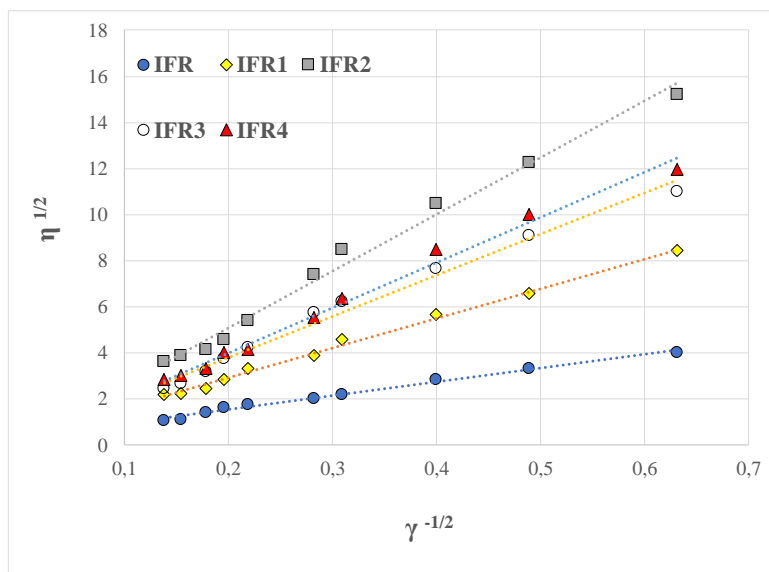


Рис. 5. Лінеаризовані залежності в'язкості IFR від швидкості зсуву

Раніше [15] нами були розроблені практичні рекомендації щодо оптимальної реології водно-дисперсійних вогнезахисних фарб інтумесцентного типу складу АРР/МА/РЕ/ТіО₂/ЕVА/наноглина (табл. 7). Згідно із запропонованими рекомендаціями відповідність продукції, що виробляється, може бути проконтрольована вимірюваннями в'язкості за Брукфілдом при вказаних швидкостях зсуву. Наведені в табл. 7 параметри розраховані для можливості нанесення фарби товщиною 1,5 мм за один прохід.

Порівняння розрахованих параметрів реології, що створюють етери целюлози (табл. 6), з рекомендованими (табл. 7) дозволяє констатувати, що значення в'язкості фарб при високих швидкостях зсуву (механічне нанесення), загущених тільки етерами целюлози (η_{∞} , табл. 6), майже в 10 разів менше рекомендованого значення (η_{∞} , табл. 7). Це означає, що фарби

інтумесцентного типу, загущені лише загусниками целюлозного типу, не можуть бути нанесені шаром в 1,5 мм за один прохід. Прогнозоване значення максимального шару фарби, яке можливо без подальших дефектів нанести механізованим способом за один прохід, складає не більше 0,5 мм.

Тим не менш, високі значення межі текучості τ_0 500-600 Па (табл. 6) роблять загусники целюлозного типу безальтернативними для зберігання фарби без розшарування та седиментації. Високе значення η_0 (табл. 6) досліджених композицій, що містять загусники НЕМС, свідчить про очікування значного внеску загусника в запобігання стікання чи провисання нанесеної фарби.

Таблиця 7

Реологічні параметри водно-дисперсійних IFR

Етап застосування фарби	Швидкість зсуву, γ , c^{-1}	В'язкість, η , Па·с	Межа текучості, τ_0 , Па
Зберігання (умови низького зсуву)	0,3	$\eta_0 > 100^1$	$\tau_0 > 30$
	1,045 (N = 5 rpm)	> 45	$\tau_0 > 30$
Нанесення механізованим способом	$> 10^3$	$\eta_\infty 1 - 1,5$	$\tau > 1000$
Мінімальне стікання	1	$\eta_0 > 100$	$\tau_0 > 25$

¹⁾ Розраховано за формулою $\eta_0 = \tau_0 / \gamma$; $\gamma = 0,3 c^{-1}$

Для перевірки впливу етерів целюлози на вогнезахисну ефективність були приготовані IFR, склад яких зазначено у табл. 4. Випробування здійснювали в міні-печі в умовах стандартної пожежі за методикою [15]. Товщина покриття на пластинах дорівнювала в середньому 1,7-1,8 мм. Метою цих випробувань є визначення межі вогнестійкості (R, табл. 8) сталевій пластині, яка відповідає часу її прогріву (хв.) до 500 °С.

Таблиця 8

Межа вогнестійкості сталевих пластин з покриттями IFR, визначена у міні-печі

Назва композиції	Товщина покриття, мм	R, хв.
IFR(EZ 3010)	1,74	28
IFR1	1,80	32
IFR2	1,79	30
IFR3	1,70	29
IFR4	1,84	33
IFR5	1,66	27
IFR6	1,73	30
IFR7	1,68	27

Результати цього експерименту демонструють відсутність негативного впливу на межу вогнестійкості домішок етерів целюлози в інтумесцентну фарбу. Значення визначених R (хв.) відрізняються в межах похибки експерименту.

Висновки. В дослідженні продемонстровано позитивний вплив етерів целюлози на реологічні властивості фарби реактивного типу в області низьких швидкостей зсуву. Показано, що загусники целюлозного типу відповідають за підтримку в'язкості продукту для запобігання седиментації при зберіганні та провисання шару фарби при нанесенні.

Встановлено, що значення динамічної в'язкості є чутливим до структури целюлозного загусника особливо в інтервалі низького зсуву, а природа полімеру не впливає на в'язкість інтумесцентних композицій. Шляхом випробувань вогнезахисної ефективності покриттів в умовах міні-печі показано, що присутність етерів целюлози не зменшує межу вогнестійкості металевих пластин.

Очевидно, що етери целюлози не можуть бути єдиними модифікаторами реології інтумесцентних композицій, бо не забезпечують необхідної в'язкості продукту в умовах високих зсувів при нанесенні. Для удосконалення реологічного профілю інтумесцентних фарб необхідна комбінація досліджених етерів целюлози з додатковими загусниками асоціативного типу.

References

1. de Silva, D., Nuzzo, I., Nigro, E., Occhiuzzi, A. E. (2022). Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: current approaches for qualification and design. *Coatings*, 12(5), 696.
2. Lucherini, A., Maluk, C. (2019). Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105712.
3. Passive Fire Protection Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Intumescent Coatings, Cementitious Materials), By Application (Construction, Warehousing), And Segment Forecasts, 2020 – 2027. *Market Analiz Report*. 2020. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/passive-fire-protection-market/toc>.
4. Beh, J. H., Yew, M. C., Saw, L. H., Yew, M. K. (2020). Fire Resistance and Mechanical Properties of Intumescent Coating Using Novel BioAsh for Steel. *Coatings*, 10, 1117.
5. Fire protecting structural steelwork. Steel Construction.info. The free encyclopedia for UK steel construction information. URL: https://www.steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelwork.
6. Mariappan, T. (2016). Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*, 34 (2), 120–163.
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. *Surface Engineering*, 36 (4), 334–363.
8. Puri, R. G., Khanna, A. S. (2017). Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14, 1–20.
9. Mohd Sabee, M. M. S., Itam, Z., Beddu, S., Zahari, N. M., Mohd Kamal, N. L., Mohamad, D., Zulkepli, N. A., Shafiq, M. D., Abdul Hamid, Z. A. (2022). Flame Retardant Coatings. Additives, Binders, and Fillers. *Polymers*, 14, 2911.
10. Saket, S., Sumit, S., Sudheer, S., Prabhu, S. V. (2019). Performance of intumescent coatings in cone calorimeter and open pool fires. *Fire Research*, 3:45, 1–7. DOI: 10.4081/fire. 2019.45.
11. Horacek, H. (2009). Reactions of stoichiometric intumescent paints. *Journal of Applied Polymer*

Література

1. de Silva D., Nuzzo I., Nigro E., Occhiuzzi A. E. Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: current approaches for qualification and design. *Coatings*. 2022. 12(5). 696.
2. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. 162. 105712.
3. Passive Fire Protection Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Intumescent Coatings, Cementitious Materials), By Application (Construction, Warehousing), And Segment Forecasts, 2020–2027. *Market Analiz Report*. 2020. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/passive-fire-protection-market/toc>.
4. Beh J. H., Yew M. C., Saw L. H., Yew M. K. Fire Resistance and Mechanical Properties of Intumescent Coating Using Novel BioAsh for Steel. *Coatings*. 2020. 10. 1117.
5. Fire protecting structural steelwork. Steel Construction.info. The free encyclopedia for UK steel construction information. URL: https://www.steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelwork.
6. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*. 2016. № 34 (2). P. 120–163.
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. *Surface Engineering*. 2019. № 36 (4). P. 334–363.
8. Puri R. G., Khanna A. S. Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2017. № 14. P. 1–20.
9. Mohd Sabee M. M. S., Itam Z., Beddu S., Zahari N. M., Mohd Kamal N. L., Mohamad D., Zulkepli N. A., Shafiq M. D., Abdul Hamid Z. A. Flame Retardant Coatings. Additives, Binders, and Fillers. *Polymers*. 2022. 14. 2911.
10. Saket S., Sumit S., Sudheer S., Prabhu S. V. Performance of intumescent coatings in cone calorimeter and open pool fires. *Fire Research*. 2019. № 3 (45). P. 1–7. DOI: 10.4081/fire. 2019.45.
11. Horacek H. Reactions of stoichiometric intumescent paints. *Journal of Applied Polymer*

- Science, 113(3), 1745–1756. DOI: 10.1002/app.29940.
12. 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. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10), 45–54.
13. Butt, M. A. (2022). Thin-Film Coating Methods: A Successful Marriage of High-Quality and Cost-Effectiveness – A Brief Exploration. *Preprints*, 2022070177.
14. Zheng, S. X., Chen, H. S. (2023). Correlations of rheological methods to coatings' performance. *Progress in Organic Coating*, 177, 107403.
15. 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*, 16, 100544.
- Science. 2009. № 113 (3). P. 1745–1756. DOI: 10.1002/app.29940.
12. Kalafat K., Taran, N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of Fire Resistance of Polymers in Intumescent Coatings for Steel Structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 4 (10). P. 45–54.
13. Butt M. A. Thin-film coating methods: a successful marriage of high-quality and cost-effectiveness – A Brief Exploration. *Preprints*. 2022. 2022070177
14. Zheng S. X., Chen H. S. Correlations of rheological methods to coatings' performance. *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 177. 107403.
15. 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. Vol. 16. 100544.

VAKHITOV RAMIL

Postgraduate, Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://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 NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1043-5596>
Scopus Author ID: 15119449100
E-mail: N.A.Taran@nas.gov.ua

RAYENKO GENNADIY

Candidate of Chemical Sciences, Senior researcher,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1923-7895>
Scopus Author ID: 8443383300
Researcher ID: J-9402-2016
E-mail: rayenko@nas.gov.ua

KOROTKIKH MYKOLA

Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0774-6588>
Scopus Author ID: 56072453300
Researcher ID: X-7107-2018
E-mail: M.I.Korotkikh@nas.gov.ua

KALAFAT KOSTIANTIN

Candidate of Technical Sciences, Researcher,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://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
<https://orcid.org/0000-0003-0637-1729>
Scopus Author ID: 36917184700
Researcher ID: D-3425-2017;
E-mail: v.bessarabov@kyivpharma.eu

SHOLOGON VIKTOR

Candidate of Chemical Sciences,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6249-5390>
Scopus Author ID: 6507045182
E-mail: Shologon@nas.gov.ua

VAKHITOVA LIUBOV

Candidate of Chemical Sciences, Senior researcher,
Department of nucleophilic reactions research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS 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.,
²RAYENKO G. F., ²SHOLOHON V. I., ^{2,3}KOROTKIKH M. I., ²VAKHITOVA L. M.

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

² L.M. Lytvynenko Institute of Physical and Organic Chemistry and Coal Chemistry
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ Institute of Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

CELLULOSE ETHERS AS RHEOLOGY MODIFIERS OF REACTIVE FIRE RETARDANT PAINTS

Purpose. To study the effect of cellulose ethers on the rheological profile of intumescent fire retardant paint with the determination of optimal structures for improving the performance properties of the paint and varnish material.

Methodology. The model intumescent system was chosen as a reactive fire protection coating containing ammonium polyphosphate, melamine, pentaerythritol, titanium dioxide, and polymer. As a polymeric component, aqueous dispersions of vinyl acetate copolymers from different manufacturers were studied. Hydroxyethyl and hydroxypropyl cellulose ethers were used as cellulose thickeners, which are recognised as the most successful rheology modifiers for paints based on vinyl acetate polymers. The viscosity of the flame retardant compositions was measured using a Brookfield viscometer, and the rheological parameters were calculated using the Kesson equation.

Findings. In the study, the influence of the nature of the polymer and cellulose thickener on the rheological parameters responsible for the storage and application of the paint material was investigated through the Brookfield viscosity of the fire retardant. It was found that the structure of the cellulose ester is important in regulating the viscosity of the studied intumescent compositions. The highest viscosity values are demonstrated by high molecular weight hydroxyethyl methyl cellulose (Bermocoll EM 7000 FQ). Hydroxypropyl methyl cellulose is a less effective thickener for intumescent paints of the ammonium polyphosphate/melamine/pentaerythritol composition. The nature of the polymer, in turn, has almost no effect on the viscosity of the studied compositions containing no thickener or containing Bermocoll EM 7000 FQ. Almost identical rheological profiles are observed for the studied polymer components of the intumescent compositions. The calculation of rheological parameters - viscosity at high shear rates, shear stress, yield strength using the Kesson equation - allows us to conclude that thickening of intumescent fire retardant paints with cellulose ethers is effective in preventing sedimentation during storage and has almost no effect on increasing the thickness of the paint layer that can be applied in one pass. By testing the fire protection efficiency of the coatings in a mini-oven, it was shown that the presence of cellulose ethers does not affect the fire resistance of metal plates.

Originality. The influence of the cellulose thickeners structure on the rheological parameters of intumescent fire retardant paint responsible for storage and application was studied for the first time.

Practical value. The obtained results make it possible to determine the optimal structures of cellulose ethers that can be used in the industrial production of intumescent paints.

Keywords: fire protection; reactive-type coating; viscosity of fire retardant paints; cellulose ethers; rheological profile.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.9>

УДК 615.3:
663.1

НІКІТІНА О. О., РОБАК А. Ю., ЦИБА Д. С.

Київський національний університет технологій та дизайну

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ВИКОРИСТАННЯ ЛІКАРСЬКИХ РОСЛИН У СУЧАСНІЙ ФАРМАЦЕВТИЦІ

Ціль. Вивчити підходи до залучення рослин у технології виробництва фармацевтичних препаратів. Провести аналіз шляхів інноваційного використання рослин у сучасних хіміко-фармацевтичних і біофармацевтичних технологіях.

Методика. Загальнонауковими і спеціальними методами аналізу та синтезу досліджувались наукові і науково-практичні роботи вітчизняних і зарубіжних вчених з вивчення шляхів інноваційного використання рослин у сучасній фармацевтиці, а також абстрактно-логічним методом – при формуванні висновків.

Результати. Проаналізовано сучасні підходи до відкриття лікарських засобів рослинного походження, які стосуються пошуку перспективних ботанічних об'єктів, методології вилучення та розділення природних сполук, нові концепції встановлення фармакологічної дії на основі фармакофілогенії рослин, поліфармакології та мережевої фармакології. Наведено приклади сучасних природних сполук-лідерів рослинного походження, що використовуються в доказовій медицині і є основою створення новітніх лікарських засобів; інтернет ресурси баз даних для встановлення цільової фармакології рослинних сполук. Окреслено використання молекулярного землеробства рослин як альтернативи в біотехнології рекомбінантних біомолекул.

Наукова новизна. Обґрунтовано трансдисциплінарний підхід у використанні потенціалу лікарських рослин у розробленні інноваційних препаратів з залученням етнофармакології, хемосистематики рослин, фітохімії, фармакології та біоінформатики.

Практична значимість. Встановлення інноваційних напрямів використання лікарських рослин дозволить підвищити успішність відкриття лікарських засобів для лікування поширених і орфанних захворювань, зменшити вартість розробки рослинних препаратів, скоротити шлях біологічно активних сполук від дослідження до виробництва і застосування в практичній медицині.

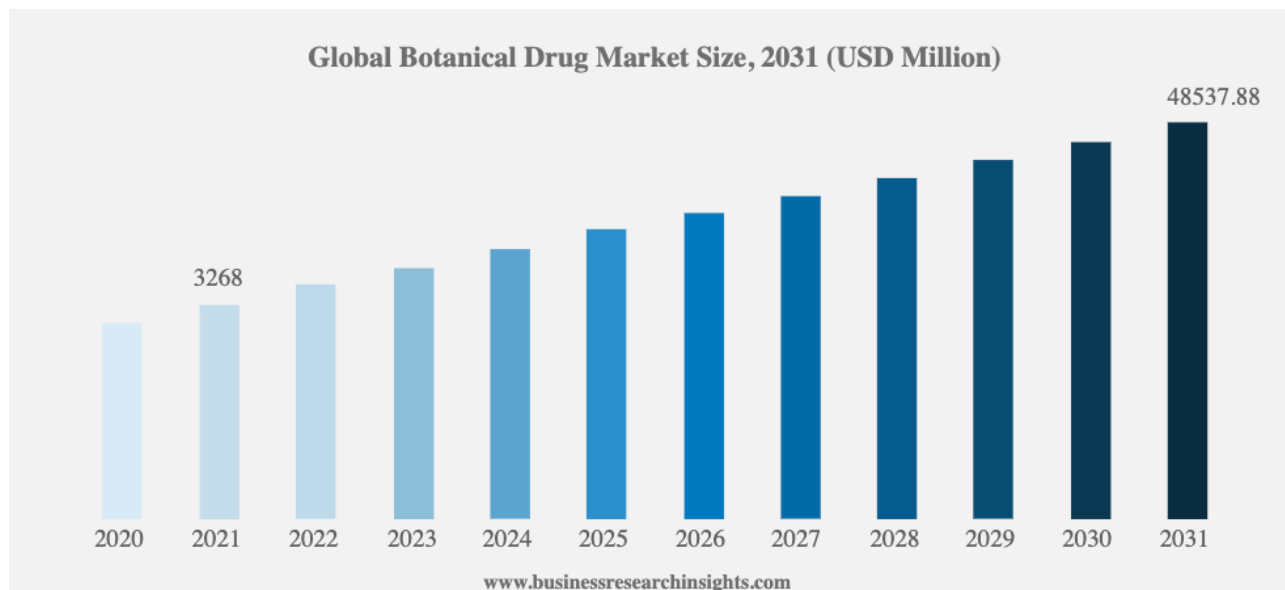
Ключові слова: лікарські засоби рослинного походження; інноваційні напрями; бази даних; фармацевтика; фармакофілогенія; поліфармакологія; мережева фармакологія; молекулярне землеробство рослин.

Вступ. Рослини є джерелом широкого спектру хімічних сполук, вони постійно досліджуються з метою пошуку нових ліків, що мають різні терапевтичні властивості. Під час лікування багатьох хвороб протягом століть медицина покладалася на ці природні речовини. Сьогодні більшість фармацевтичних препаратів виготовляються з цих біоактивних сполук, деякі з них отримують за допомогою хімічного синтезу, але в фармацевтичній технології цілого ряду цінних активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) альтернативи рослинним джерелам й досі не існує [1]. Знання, що отримувались століттями при вивченні систематики, будови і хімічного складу рослин, поєднані з сучасними можливостями аналітичної хімії, фармакології, технології виробництва лікарських засобів, біоінформатики, сприяють формуванню інноваційних підходів в дослідженні та використанні лікарських рослин (ЛР) для задоволення цілей фармацевтичного виробництва.

Царство рослин складає біля 300 000 видів, які продовжують розвиватись на видовому і популяційному рівні, адаптуватись до різноманітних умов навколишнього середовища, створюючи нові речовини для адаптації та захисту [2]. Характерні ендогенні рецептори людини, що забезпечують важливі фізіологічні функції, активуються хімічними речовинами рослин: нікотинові, мускаринові, опіодні та нещодавно відкриті канабіноїдні рецептори. Багато інших зв'язків між структурою та діяльністю, що мають фізіологічне і фармакологічне значення, ще належить охарактеризувати. У міру розвитку технологій фармацевтична промисловість все більше зосереджується на геномі людини для профілактики, діагностики та

лікування хвороб [3], йде активний пошук великих та малих терапевтичних молекул і серед тих, що синтезуються рослинами з залученням трансдисциплінарних підходів.

Постановка завдання. Ринок лікарських засобів (ЛЗ) рослинного походження набирає обертів у всьому світі. Зростаюча популярність і обізнаність щодо переваги ліків з лікарської рослинної сировини сприяють постійному зростанню ринку лікарських рослинних засобів. За даними Business Research Insights [4] у 2021 році ринок рослинних препаратів оцінювався в 3,268 млрд дол. США, а до 2031 року прогнозується, що він досягне оцінки в 4,854 млрд дол. США (рис. 1) з середньорічним темпом зростання 4,0%.



Джерело: [4].

Рис. 1. Обсяг світового ринку рослинних препаратів

На ринку є провідні гравці: Pharmaceutical, Bionorica Se, Jumpcan Pharmaceutical, Guangzhou Baiyunshan Pharmaceutical, Huarun 999, Taiji, GW Pharmaceuticals, Tasly Holding Group, Weleda, Yunan Baiyao, China TMC, Tsumura, Schwabe, Tong Ren Tang. Окрім видатних гравців галузі, з'являються й зберігають ринкову конкуренцію різноманітні компанії з передовими технологіями, виробничими площадками, партнерством, інноваційними продуктами, обладнанням, ланцюгом поставок, злиттями, поглинаннями, розширеннями, які впливають на відсоток ринку. Понад 20% обороту фармацевтичних компаній сьогодні припадає на лікарські засоби рослинного походження. Деякі з них є оригінальним натуральним продуктом, інші – синтетичним еквівалентом або синтетичними похідними, призначеними для підвищення ефективності або зменшення супутніх побічних ефектів [5].

Існує велика потреба стимулювати ентузіазм наукових дослідників щодо включення лікарських рослин у процес розробки ліків. Однак головні складнощі, що пов'язані з використанням ЛР, виникають на етапі розробки ЛЗ у випадку несвідомого і необґрунтованого вибору рослинного об'єкта. Щоб збільшити відсоток успіху, необхідно задіяти інноваційні підходи для відбору перспективного списку видів ЛР, які слід досліджувати, володіти інформацією про будову, біологію і хемосистематику рослин. Знання про рослинні ЛЗ, які використовуються в медицині, можуть бути корисними для подолання проблем, зменшення вартості та часу, успішності відкриття і розробки рослинних препаратів. Важливим є включення ботанічної складової в освіту фахівців з фармацевтичної і хімічної технології, оскільки ці напрями передбачають переробку сировини природного, зокрема рослинного походження для забезпечення потреб фармацевтики та інших галузей хімічного та біотехнологічного виробництва.

Результати дослідження. У розробці інноваційних ефективних та доступних препаратів виділяють наступні аспекти: різке скорочення витрат виробництва біологічних препаратів; суттєве «поліпшення ліків» при застосуванні комп'ютерних та комбінаторних методів; повернення до масштабних досліджень природних продуктів як джерел ЛЗ; створення ЛЗ шляхом раціонального дизайну структури молекули та застосування біоміметичного підходу, що дає змогу з високою ймовірністю очікувати на «серендипність» (випадкове знаходження вдалого) та інтуїцію дослідників [6].

Історичний і традиційний досвід терапевтичного застосування рослинної сировини значною мірою допомагає у пошуку певних хімічних складових, дозволяє створити технології очищення, відтворення штучного синтезу і введення їх в сучасну систему медицини. Етнофармакологічне використання ЛР було і залишається одним із найважливіших джерел пошуку біологічно активних сполук, що вводяться в офіційну медицину. Ця закономірність спостерігається у всіх країнах і етнічних групах і Україна не є виключенням [7, 8].

Таблиця 1

**Відомі сполуки рослинного походження, дозволені в Україні
 до терапевтичного використання**

Сполука	Біологічна дія	Кількість препаратів в «Державному реєстрі лікарських засобів України»	Види рослин
Фенольні сполуки			
Ацетилсаліцилова кислота	Анельгетична Кардіоваскулярна Протизапальна	42	<i>Salix</i> spp. (Види верби), <i>Spirea</i> spp. (Види спіреї)
Кверцетин	Ангіопротекторна	8	<i>Quercus robur</i> L. (Дуб черешчатий)
Гесперидин		15	<i>Citrus</i> spp. (Види цитрусових)
Діосмін		17	<i>Scrophularia nodosa</i> L. Ранник вузлуватий
Силімарин	Гепатопротекторна	27	<i>Silybum marianum</i> (L.) Gaertn. (Розторопша плямиста)
Алкалоїди			
Леводопа	Протипаркінсонічна	29	<i>Muscina pruriens</i> (L.) DC. (Мукуна пекуча)
Ефедрин	Симпатоміметична	12	<i>Ephedra</i> spp. (Види ефедри)
Атропін	Розширення зіниці Антихолінергічна	12	<i>Atropa belladonna</i> L. (Красавка беладонна)
Морфін	Анальгетична	28	<i>Papaver somniferum</i> L. (Мак снодійний)
Папаверин	Спазмолітична	23	
Кодеїн	Протикашльова	38	
Глауцин		8	
Вінкристин Вінбластин	Протиракова	8	<i>Catharanthus roseus</i> L. (Барвінок рожевий)
Ерготамін	Вазоконстрикція	1	<i>Claviceps purpurea</i> (Fr.)
Ніцерголін	α_1 -, α_2 - адреноблокуюча	9	Tul. (Ріжки пурпурові)

Продовження табл. 1

Сполука	Біологічна дія	Кількість препаратів в «Державному реєстрі лікарських засобів України»	Види рослин
Кофеїн	Стимулююча ЦНС	50	<i>Camellia thea</i> Link (Чай китайський)
Нікотин		19	<i>Nicotiana tabacum</i> L. (Тютюн звичайний)
Пілокарпін	М-холіноміметична	7	<i>Pilocarpus</i> spp. (Види пілокарпусу)
Терпенові сполуки			
Камфора	Аналептична	46	<i>Laurus camphora</i> L. (Камфорне дерево)
Ментол	Поліфармакологічна	126	<i>Mentha x piperita</i> L. М'ята перцева
Тимол	Антисептична, дезінфікуюча, антигельмінтна	74	<i>Thymus</i> spp. (Види чабрецю)
Гліциризинова кислота	Поліфармакологічна	2	<i>Glycyrrhiza glabra</i> L. (Солодка гола)
Серцеві глікозиди			
Дигоксин	Кардіотонічна	12	<i>Digitalis lanata</i> Ehrh. (Наперстянка шорстиста)
Строфантин		3	<i>Strophanthus</i> spp. (Види строфанту)

Природні сполуки, отримані з ботанічних джерел, належать до різних класів біологічно активних сполук (табл. 1) і безпосередньо використовуються як терапевтичні засоби або для розробки більш потужних аналогів, які можуть забезпечити нову фармакологічну дію. Їх можна перетворити на ЛЗ або хімічні речовини-маркери для стандартизації рослинних екстрактів. Найчисельніша група, препарати якої присутні в Державному реєстрі лікарських засобів України, представлена алкалоїдами (табл. 1). З дев'ятнадцятого століття біоактивність цих сполук використовувалася для виробництва терапевтичних і психоактивних препаратів. Алкалоїди виявляють від лікарської до гострої токсичної дії залежно від дозування. Види вищих рослин, що належать до родин *Berberidaceae*, *Amaryllidaceae*, *Papaveraceae*, *Ranunculaceae* і *Solanaceae*, є помітно багатими алкалоїдами, виходячи з наявних на сьогоднішній день повідомлень [9]. Останнім часом біосинтез і біологічна активність сполук, синтезованих у різних рослинних тканинах, були широко вивчені [10]. Фармацевтична промисловість використовувала ці природні сполуки для розробки рецептур з кращим терапевтичним потенціалом.

Як правило, сполуки, виділені з природних джерел, мають деякі унікальні структурні характеристики, включаючи більшу кількість атомів кисню, більше хіральних центрів, складну стеріоізомерію і молекулярну стабільність, більшу кількість акцепторів і донорів водневих зв'язків. Крім того, існує великий діапазон молекулярних властивостей, включаючи коефіцієнт розподілу, молекулярну масу та різноманітність кільцевих систем [11]. Завдяки цим унікальним характеристикам природних сполук розробка аналогів для покращення ефективності та фармакокінетичних властивостей або зниження токсичності є складним завданням для хіміків.

Сучасні підходи до відкриття ЛЗ рослинного походження як і раніше базуються на етноботаніці і етнофармакології. Основу цього підходу складає вивчення рецептури зборів та методів екстракції, що використовуються різними етнічними групами. З'ясовуються подробиці щодо напряму використання і дозування збору. Однак, потрібен належний скринінг, оскільки різні етнічні групи мають різні концепції здоров'я та системи охорони здоров'я. Це також стосується і традицій українського етносу з віковим досвідом використання ЛР, який перегукується з європейським, але має певні відзнаки, що обумовлені чисельністю флори різних ботаніко-географічних зон України [8]. Отже, симптоми, що вказані в прописах, слід правильно інтерпретувати перед використанням будь-якого складу в терапевтичних цілях. Також використовується етнофармакологічний підхід у поєднанні з випадковим високопродуктивним скринінгом, який відомий як біораціональний підхід [12]. Довга історія використання збільшує ймовірність високої біологічної активності нових сполук-кандидатів. Таким чином, поєднання традиційних і сучасних підходів спрощує вибір ліків і робить його високоефективною пошуковою системою у світі рослин.

У процесі розробки препарату біологічно активні компоненти виділяються з рослинного екстракту. Часто рослинний екстракт виявляється більш активним, ніж очищена сполука. В тому випадку, коли фармакологічний ефект регулюється не одним компонентом і обумовлений синергічною дією багатьох сполук, необхідна стандартизація екстракту. Іноді найбільшу біологічну активність виявляють ні екстракти та очищені сполуки, а окремі фракції. Так, стандартизовані фракції сапонінів *Panax ginseng* більш активні, ніж ізольовані сполуки [13].

Методологія вилучення та розділення природних сполук через різноманітність хімічної структури, відмінності в стабільності та фізико-хімічних властивостях завжди була складною технологічною і хімічною проблемою. Коли існує потреба у відокремленні конкретної сполуки, використовується широкий арсенал інструментальних методів хімічного аналізу. Колонкова хроматографія, що часто поєднуються з певною формою техніки скринінгу, щоб переконатися, що цікаві молекули присутні в розділених фракціях. Біологічний аналіз, або підтвердження присутності сполуки можна проводити за допомогою ядерного магнітного резонансу або мас-спектроскопії. Загальні методи розділення включають високоефективну рідинну хроматографію або більш інформативні підходи, такі як мас-спектроскопія на рідинному хроматографі, які можна використовувати для встановлення структури сполуки [14]. На активність АФІ значною мірою впливають умови процесу екстракції [15]. Сьогодні це призвело до чисельних процедур екстракції, які використовуються хіміками, починаючи від базових прийомів спиртової екстракції і закінчуючи екстракцією надкритичним CO₂.

Традиційний пошук джерел АФІ серед ботанічних об'єктів є перспективним шляхом для відкриття ліків, але іноді він виявляється неефективним і дорогим. Нещодавно з'явився економічно ефективний трансдисциплінарний підхід, який скорочує час фармакологічних досліджень і знижує рівень токсичності отриманих ліків порівняно зі звичайним методом. Цей новий підхід називається зворотною фармакологією (ЗФ), коли проводяться і документуються клінічні дослідження рослинних рецептур народної медицині [12]. Отримані висновки експериментально перевіряються, що дозволяє визначитись з ефективністю засобу. Потім досліджують дозу і переносимість препарату та проводять аналіз *in vitro* та *in vivo* на певну біологічну дію препарату. На останньому етапі проводять клінічні та експериментальні дослідження на різних рівнях біологічної організації. Це призводить до належної ідентифікації та перевірки дослідження ЗФ разом з безпекою та ефективністю рослинного ЛЗ. Таким чином, трансдисциплінарний підхід замінив загальний шлях «від лабораторії до клініки» на шлях «від клініки до лабораторії». ЗФ об'єднує сучасні технології та традиційну медицину та покращує їх взаємодію. Підхід ЗФ базується на цілеспрямованому скринінгу потенційних сполук з функціональною активністю та може бути використаний для відкриття ліків. Відкриття ліків

на основі ЗФ залучує людину на всіх етапах, гарантуючи безпеку та ефективність отриманих засобів. Однак, важливо відзначити, що знання про використання ЛР в народній медицині зникають навіть швидше, ніж біорізноманіття видів рослин і з нинішнім темпом глобалізації є ризик втратити назавжди велику кількість цінної інформації.

Новим напрямом використання потенціалу лікарських рослин у розробці інноваційних безпечних лікарських засобів є фармакофілогенія (ФФГ), що розроблена під час практики медичних досліджень шляхом взаємного проникнення етнофармакології, хемосистематики рослин, фармакології та біоінформатики [16]. У своїх підходах ФФГ спеціалізується на вивченні внутрішніх зв'язків і законів між спорідненістю рослин, хімічним складом і лікувальним ефектом і використовує їх для пошуку та вдосконалення ліків.

Фізіологічно активні компоненти ЛР здебільшого відносяться до вторинних метаболітів, їх розподіл у рослинному світі також закономірний. ЛР мають невід'ємний зв'язок між генетичним походженням, хімічним складом і лікувальною дією. Завдяки ФФГ ідентифіковано досить багато фітохімічних компонентів різних ЛР, що обґрунтовує необхідність комплексного врахування морфологічних і анатомічних ознак, маркерів ДНК і хімічних маркерів у висновках про філогенію лікарських рослин. Було запропоновано деякі нові концепції щодо біопошуку та використання лікарських рослин, наприклад, «етноботанічна конвергенція», яка стосується подібного використання рослин, включених до одного вузла філогенезу. ФФГ підхід разом із революцією «оміки» показує, як поєднання сучасних технологій із традиційними етноботанічними знаннями може бути використане для виявлення потенційних нових застосувань лікарських рослин. Наприклад, рослини роду *Plantago* L. поширені у всьому світі, їх чисельність налічує близько 275 видів. Вітчизняна фармація до фармакопейних видів відносить *Plantago maior* L., *Plantago lanceolata* L., *Plantago psyllium* L. та *Plantago ovata* Forssk. У ДФУ 2.0 до цих видів включено п'ять фармакопейних статей на лікарську рослинну сировину. Національна монографія «Подорожника великого листя^N» регламентує визначення вмісту полісахаридів, що представлені пектиновими речовинами та нейтральними гліканами. Препарати на основі подорожника використовуються як джерело слизу. Хемосистематичне значення для видів цього роду мають іридоїдні глікозиди: аукубин, каталпол, плантареналозид і барціозид [17]. Сполуки відносяться до циклопентанових іридоїдів типу C₉ і C₁₀ і вивчаються як перспективні у створенні ліків для лікування хвороби Альцгеймера і Паркінсона.

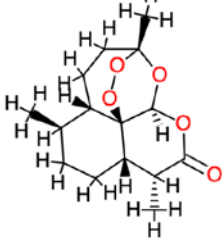
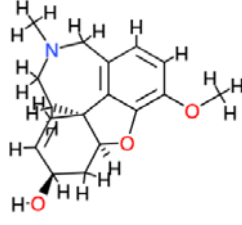
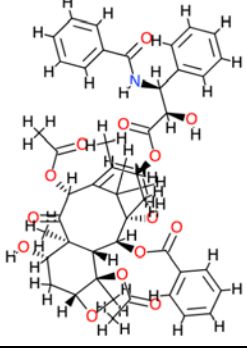
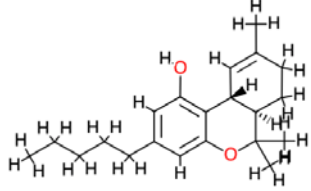
Більш складні хімічні структури зазвичай мають більш вузький філогенетичний розподіл. Іноді подібні або навіть ідентичні складові розподіляються в різних таксономічних групах. Наприклад, *N*-метилцитизин у великій кількості міститься в *Berberidaceae*, *Fabaceae* і *Scrophulariaceae*, але ці три родини не дуже близькі і можна зробити припущення про паралельну еволюцію шляху біосинтезу алкалоїдів [16]. Знання про ФФГ можуть вплинути як на вибір рослинного матеріалу при відкритті препаратів, так і на оцінку передбачуваних шляхів біосинтезу. Кореляція між філогенезом і біосинтетичними шляхами робить більш ефективним вибір рослин для дослідження і введення в офіційну медичну практику. Різноманітність алкалоїдів, що інгібують ацетилхолінестеразу *in vitro* та зв'язування з транспортером зворотного захоплення серотоніну, суттєво корелюють із філогенією підродини *Amaryllidoideae*, підтверджуючи цінність використання ФФГ для вибору таксонів-кандидатів. Нещодавно у Швеції вперше в Європі схвалено використання галантаміну із цибулин і квіток роду *Galanthus* і виду *Leucojum aestivum* L. [18], сполуку використовують для лікування хвороби Альцгеймера (табл. 2). Філогенетичний підхід виявився корисним для визначення видів *Artemisia*, які мають протималярійні властивості [16]. В етноботаніці зареєстровано щонайменше 117 видів *Artemisia*. Під час філогенетичного аналізу було виявлено, що крім виду *A. annuum*, для лікування малярії використовуються і інші представники, які можуть бути пріоритетними для подальшого дослідження. Після хімічного

аналізу артемізинін (табл. 2) було виявлено в дев'яти видах, вісім з яких є новими протималярійними рослинами [19]. Артемізинін може бути поширеним у всьому роді і, якщо брати до уваги місцеві ресурси і традиції використання полину в Україні, доступним і цікавим є поширений вид *A. absinthium* L. [20].

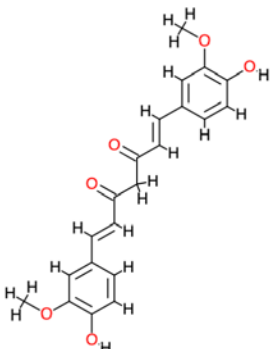
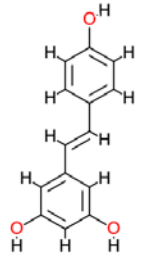
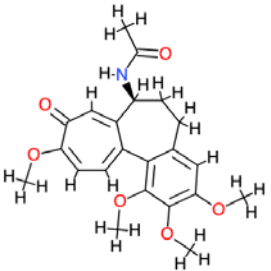
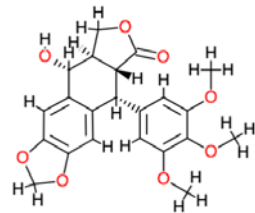
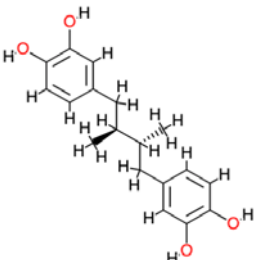
Інноваційним підходом є впровадження у фармацевтичний скринінг натуральних продуктів ряду новітніх технологій, які радикально змінили початковий етап створення лікарських засобів і серед них тотальний високоефективний скринінг (high throughput screening – HTS), який започатковувався переважно для скринінгу синтетичних сполук [21].

Таблиця 2

Сучасні природні сполуки-лідери, що використовуються в доказовій медицині

Назва і структура сполуки	Лікарська рослина	Кількість оглядів за Кокранівською базою (роки) [23]	Показання (механізм дії)
Артемізинін 	<i>Artemisia annuum</i> L.	20 оглядів (1998–2022)	Лікування малярії (індукція перерозподілу гему в цитозолі паразиту)
Галантамін 	<i>Galanthus nivalis</i> L., <i>Leucojum aestivum</i> L.	11 оглядів (2006–2023)	Лікування деменції (інгібітор ацетилхолінестерази)
Паклітаксел 	<i>Taxus brevifolia</i> Nutt	26 оглядів (1999–2023)	Хіміотерапія раку (інгібітор мітозу)
Дронабінол 	<i>Cannabis sativa</i> L.	5 оглядів (2009-2022)	Хронічний нейропатичний біль (активація канабіноїдних рецепторів CB1 і CB2)

Продовження табл. 2

Назва і структура сполуки	Лікарська рослина	Кількість оглядів за Кокранівською базою (роки) [23]	Показання (механізм дії)
<p>Куркумін</p> 	<i>Curcuma longa</i> L.	4 огляди (2005–2020)	Підтримка ремісії при виразковому коліті (інгібування <i>NF-κB</i> транскрипційного фактору)
<p>Ресвератрол</p> 	<i>Vitis vinifera</i> L., <i>Reynoutria japonica</i> Houtt.	2 огляди (2020; 2023)	Для дорослих з цукровим діабетом 2 типу (інгібування <i>NF-κB</i> транскрипційного фактору, антиоксидант)
<p>Колхіцин</p> 	<i>Colchicum</i> spp.	25 оглядів (1998–2023)	Подагра (зв'язування тубуліну)
<p>Пододфілотоксин</p> 	<i>Podophyllum peltatum</i> L.	2 огляди (2014; 2020)	Місцеве лікування шкірних бородавок (зв'язування тубуліну/інгібітор <i>IGF-1R</i>)
<p>Мазопрокол</p> 	<i>Larrea tridentata</i> (Sesse & Moc. ex DC.) Coville	1 огляд (2012)	Хіміотерапія раку (інгібітор ліпоксигенази)

Очікуваним результатом цього методу та алгоритмів пошуку нових біологічно активних сполук є отримання так званої «сполуки-лідера». Сполука-лідер (lead-compound) – це «структурний прототип» майбутнього ЛЗ, що характеризується визначеною фізіологічною активністю, на базі якої і буде створюватися препарат. Сполука-лідер повинна володіти бажаною біологічною активністю та бути придатною для подальшої структурної оптимізації. Крім того, сполука-лідер не повинна бути дуже полярною чи ліпофільною (для уникнення проблеми з біодоступністю), не містити групи, що можуть утворювати токсичні метаболіти, а також не повинна незворотно (ковалентно) реагувати з біологічною мішенню. Одними з найбагатших джерел біологічно активних сполук залишаються речовини рослинного походження. Приклади таких сполук з їх рослинним джерелом і показаннями до використання наведені у табл. 2. Підтвердженням цього є і «класичні» приклади (табл. 1). До інших прикладів сполук-лідерів рослинного походження можна віднести алкалоїди кураре, папаверин, атропін. HTS включає високоякісні компоненти та аналізи, які використовуються для дослідження біологічної активності багатьох зразків природних речовин [6]. Доступна і добре задокументована етнофармакологічна інформація про традиційне використання рослин іноді дає підказки щодо терапевтичної дії сполук. Існує підвищений інтерес до можливості аналізу цих природних сполук. Крім того, було навіть продемонстровано, що природні продукти, які ефективно використовуються у створенні ЛЗ, з високою ймовірністю будуть використовуватися і в етнічній медицині, навіть якщо про це не було відомо на етапі розробки ліків (наприклад, відкриття в деревині *Taxus brevifolia* паклітакселу (таксолу) [22], що має протиракову дію (табл. 2), проводилося за допомогою підходу випадкового скринінгу, але пізніше виявилось, що рослина використовувалася в західній індійській культурі у якості ліків). З удосконаленням аналітичних інструментів і методів фракціонування для ідентифікації, виділення та очищення природних продуктів скринінг цих природних сполук зараз може проводитись на основі HTS.

Будь-які суттєві чи незначні покращення властивостей молекули сполуки-лідера призводять до нових аналогів, які оптимізуються до АФІ-кандидату на ЛЗ. Наприклад, саліцилова кислота володіє слабкою протизапальною дією, а її похідне ацетилсаліцилова кислота є незворотнім інгібітором циклооксигенази та використовується для профілактики тромбозів (табл. 1), основний алкалоїд *Erythroxylum Coca* – кокаїн, відомий як перший засіб для місцевого знеболювання, мав побічну дію і непередбачувані токсичні ефекти, згодом заміна його на прокаїн зі зміною в певних частинах молекули поклала основу всім сучасним засобам місцевої анестезії. Підхід до створення ліків на основі фрагментів (fragment-based drug discovery – FBDD) – це нова концепція, яка використовується як альтернатива HTS у фармацевтиці. Цей підхід базується на структурному дизайні ліків і використовує рентгенівську кристалографію або ЯМР-спектроскопію для ідентифікації сильнодіючих молекул. Він може ідентифікувати дуже малі молекули (фрагменти) з низькою молекулярною вагою (~150 Да), які зв'язуються з макромолекулами або препаратами. FBDD допомагає знайти шляхи сполук до біологічних мішеней, які раніше були невідомі. Щоб допомогти вирішити ці проблеми, нещодавно були розроблені потужні хімічні протеомні підходи для глобального дослідження здатності білків зв'язувати малі молекули (тобто здатність до лігандування) безпосередньо в нативних системах [24]. Розповсюдженню підходів FBDD сприяє вдосконалення та розробка нових обчислювальних інструментів та біофізичних методів, а також поповнення бібліотек фрагментів.

Відкриття більшості нових ліків зосереджено на ідентифікації або розробці фармакологічно ефективного агента, який специфічно взаємодіє з однією мішенню. Однак, препарати, що діють на окремі молекулярні мішені, зазвичай мають незадовільний терапевтичний ефект або виявляють токсичність, коли використовуються для лікування діабету, запалень та раку. Інноваційні концепції, відомі як поліфармакологія та мережева

фармакологія, базуються на багатоцільовому підході. Відомо, що рослинні сполуки мають вищі поліфармакологічні профілі, ніж синтетичні молекули [25]. Деякі біологічно активні молекули (поліфеноли, флавоноїди, терпени, сапоніни, алкалоїди) з ЛР успішно лікують багато захворювань людини. Середній ступінь зв'язності натурального продукту у мережі взаємодії лікарський засіб-мішень (drug-target interaction – DTI) становить 6,03, що є сильнішим, ніж показник 2,22 у ліків на основі синтетичних сполук (P -значення $< 2,2 \times 10^{-16}$, тест Вілкоксона) [12]. Fang та ін. [26] проілюстрували поліфармакологічний профіль п'яти природних сполук (куркуміну, епігалокатехінгалату, кверцетину, ресвератролу, берберину) і представили різні методи вивчення DTI на основі бази даних DrugBank (табл. 3). Подібним чином віртуальний скринінговий підхід використовувався для визначення поліфармакологічного профілю рослинного алкалоїду галантаміну [27]. Створення баз даних і розробка нових інструментів біоінформатики прискорює і покращує поліфармакологічні дослідження. Кілька баз даних, що надають корисну інформацію для реконструкції DTI натуральних продуктів, наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Інтернет ресурси баз даних для встановлення цільової фармакології рослинних сполук

Назва бази	Характеристика	Кількість сполук	Електронний ресурс
Загальні бази даних лікарських сполук, що вміщують природні сполуки			
ChEMBL	База даних біоактивних малих молекул, подібних до ліків, та їх біоактивність.	2 371 556	https://www.ebi.ac.uk/chembl/
BindingDB	Загальнодоступна база даних молекулярного розпізнавання, підтримує дослідження, освіту та практику в області відкриття ліків, фармакології та суміжних галузях.	520 723	https://www.bindingdb.org/rwd/bind/index.jsp
PubChem	Репозитарій біологічної активності малих молекул.	Більше 230 млн	https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/
DrugBank	Надає дані про ліки (хімічні, фармакологічні та фармацевтичні характеристики).	11 919	https://go.drugbank.com/
TTD	Інформація про терапевтичні мішені.	31 614 та 2589 мішеней	https://db.idrblab.net/ttd/
DGIdb	База даних взаємодії ліків і генів.	10 000 та 40 000 генів	http://dgidb.genome.wustl.edu/about
STITCH	Експериментальні та прогнозовані взаємодії сполуки та білка.	500 000 та 9 600 000 білків	http://stitch.embl.de/
Super-Pred	Веб-сервер прогнозування коду АТС і цільового прогнозування мішеней малих молекул.	341 000 та 1800 мішеней	https://prediction.charite.de/index.php
HIT 2.0	Платформа для пошуку та підбору рослинних інгредієнтів і інформація про молекулярні мішені.	1 260	http://hit2.badd-cao.net/

Продовження табл. 3

Назва бази	Характеристика	Кількість сполук	Електронний ресурс
Бази даних природних сполук			
TCMSP	База даних природних сполук, мішені та цільові мережі, фармакокінетичні властивості, біодоступність, розчинність.	29 384	https://tcmsp-e.com/tcmsp.php
NPACT	База даних цільової активності протиракових сполук природного рослинного походження	1 574	http://crdd.osdd.net/raghava/npact/

Широкомасштабні дані експериментів, які характеризують спорідненість зв'язування ЛЗ рослинного походження із білками, надають кілька широко використовуваних баз даних, такі як ChEMBL, BindingDB, PubChem, DrugBank, Therapeutics Target Database (TTD) та DGIdb (табл. 3). ChEMBL містить 14 371 197 фактів біологічної дії, що виявлені для 2 371 556 сполук проти 11 224 мішеней. DrugBank – це база даних, яка використовується частіше за всі інші. Вона містить 11 919 записів про ЛЗ (станом на 4 квітня 2024 року), включаючи низькомолекулярні сполуки поширеного терапевтичного застосування.

Деякі інші поширені бази даних, такі як STITCH і SuperPred, включають як експериментальні дані про спорідненість зв'язування, так і прогнозовані обчислені дані. Наприклад, STITCH – це ресурс, який містить як підтверджену експериментально, так і обчислену передбачену взаємодію між хімічними речовинами та білками з доказами різних джерел: експериментальні дані, дані літератури, підібрані вручну, з текстовою інформацією та обчисленими даними. SuperPred надає експериментально зареєстровані DTI та прогнозовані DTI, отримані з аналізу подібності молекулярної будови [26].

Відповідно до теорії мережевої біології, біологічно активні сполуки, які можуть діяти на дві або більше мішеней, є більш ефективними, ніж ті, що діють на одну мішень [28]. Отже, мережева фармакологія є наступною парадигмою у відкритті ліків через поліфункціональність активних сполук та ефективність у поясненні принципів теорії мереж і системної біології. Багато тематичних досліджень для офіційної медицини базуються на цьому підході [29–31]. Мережевий фармакологічний підхід також застосовується для вивчення різних біологічних систем, захворювань, ліків і шляхів DTI [32].

Фармацевтичні продукти напряму, що найшвидше розвивається, є біологічні препарати на основі білка. Сучасним підходом в їх виробництві є використання рослин як альтернативи в біотехнології рекомбінантних біомолекул. Процес, відомий як молекулярне землеробство рослин (plant molecular farming – PMF), пропонує економічно ефективне, безпечне та масштабоване виробництво унікальних молекул [33]. Ці цінні для фармацевтики речовини можна виробляти з використанням у якості системи експресії рослинні організми [34–36]. Речовини можуть бути складними, містити додаткові компоненти (глікозидні частини та жирні кислоти) і їх можна розділити на кілька основних категорій: малі біоактивні молекули, модулятори рецепторів, моноклональні антитіла (mAbs), ферменти для замісної терапії і вакцини [37]. В середовищі рослинних клітин будь-які компоненти ссавців сприйнятливі до передачі вірусів або пріонів, наприклад, пов'язаних із губчастою енцефалопатією великої рогатої худоби, відсутні. Системи рослинних клітин за своєю природою не несуть ризику зараження або передачі патогенів від людини чи іншої тварини. Більш того, культури клітин рослин є природним бар'єром для зараження патогенами ссавців, оскільки спроби розмножити віруси ссавців у клітинах рослин були невдалими [38]. Віруси рослин не можуть поширюватися в культурах рослинних клітин, оскільки для переміщення їм не вистачає

плазмодесм [39]. Ці фактори важливі не тільки з точки зору безпеки, але й значно знижують експлуатаційні витрати порівняно з системами експресії на основі клітин ссавців. У табл. 4 представлені основні світові лідери виробництва біопрепаратів рослинного походження.

Таблиця 4

Біопрепарати рослинного походження у фармацевтиці світових лідерів

Компанія	Сайт	Продукт	Використання	Рослина система
Protalix Biotherapeutic, Ізраїль	https://protalix.com/	Elelyso [®] (Таліглоцераза альфа для ін'єкцій)	Хвороба Гоше	<i>Daucus carota</i>
		PRX-102 (Пегунігалсидази альфа)	Хвороба Фабрі	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
		PRX-115 (Уриказа)	Важка подагра	
ExpressTec, США	https://expresstec.bio/	Лактоферин VEN120	Запальне захворювання кишечника	<i>Oryza sativa</i>
Aramis Biotechnologies, Канада	https://aramisbiotechnologies.com/en/	VLPs (Вакцина проти грипу)	Сезонний грип	<i>N. benthamiana</i>
		Covifenz [®] (Вакцина)	SARS-CoV-2	
Kentucky BioProcessing Inc, США	https://kbio.com/our-company/	KBP-201 (Вакцина з олігонуклеотидами CpG)		
Baiya Phytopharm Co., Ltd., Тайланд	https://baiyaphytopharm.com/	Baiya SARS-CoV-2 Vax 1 (Вакцина)		
Diamante Società Benefit, Італія	https://www.diamante.tech/	Вірусоподібні частинки рослин	Дослідницькі реагенти	
IBio Inc., США	https://ibioinc.com/	Фактори росту, цитокіни, лектини, антитіла	Розлади імунітету, діагностика	
Leaf Expression Systems, Великобританія	https://www.leafexpressionsystems.com/			
Agrenvec, Мадрид, Іспанія	https://www.agrenvec.es/			
Mapp Biotherapeutics, Inc., США	https://mappbio.com/	ZMapp [™] (Моноклональні антитіла)	Вірус Ебола	
ORF Genetics, Ісландія	https://www.orfgenetics.com/	Епідермальний фактор росту (hEGF)	Біологічно активний косметичний інгредієнт	<i>Hordeum vulgare</i>
Synthon, Нідерланди	https://www.synthon.com/en	BLX-301 (Антитіла)	Неходжкінська лімфома	<i>Lemna minor</i>
TransAlgae, Ізраїль	https://www.transalgae.com/	Платформа пероральної доставки вакцин	Біоінкапсуляція для пероральної доставки білкових АФІ	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>

Продовження табл. 4

Компанія	Сайт	Продукт	Використання	Рослина система
Merck, працює як Sigma-Aldrich, США	https://www.sigmaaldrich.com/UA/en	Авідин А8706 (Антитіла)	Дослідницькі реагенти	<i>Zea mays</i>
Greenlab, Inc., Данія	https://www.greenlab.com/	Браззеїн	Білковий замінник цукру	

Діагностичні і терапевтичні білки рослинного походження зараз присутні в лінійці препаратів багатьох компаній (табл. 4). Поряд з першими продуктами РМФ (Авідин і β -глюкуронідаза), що 20 років існують на фармацевтичному ринку [40], з'явилися чисельні новітні засоби. Біопрепарати рослинного походження, що є на комерційному ринку, представлені продукцією фармацевтичних компаній Європи, США, Ізраїлю та ін. Вони уявляють собою переважно противірусні вакцини і ферменти, що використовуються для лікування орфанних хвороб (хвороба Гоше, хвороба Фабрі). У той час як звичайне біофармацевтичне виробництво включає невелику кількість добре встановлених платформ, таких як бактерія *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae*, клітини яєчників китайського хом'яка, мишачі клітини NS0 і Sp2/0 і клітини нирок ембріона людини (НЕК293), серед рослин, як виробничі платформи, запропоновано багато різних видів, включаючи тютюн, ряску, кукурудзу, рис, ячмінь, моркву, картоплю, томати, люцерну, сафлор, салат, полуницю, мох, пшеницю та ін. [33]. Різноманітність рекомбінантних білків демонструє потенціал рослин як універсальних платформ для виробництва фармацевтичних препаратів білкової природи.

Висновок. Проаналізовано інноваційні підходи до відкриття лікарських засобів рослинного походження, які стосуються пошуку перспективних ботанічних об'єктів, методології вилучення та розділення природних сполук, нові концепції встановлення фармакологічної дії на основі поліфармакології та мережевої фармакології. Наведено приклади сучасних природних сполук-лідерів рослинного походження, що використовуються в доказовій медицині і є основою створення новітніх лікарських засобів; інтернет ресурси баз даних для встановлення цільової фармакології рослинних сполук. Обґрунтовано трансдисциплінарний підхід у використанні потенціалу лікарських рослин у розробці інноваційних препаратів з залученням етнофармакології, хемосистематики рослин, фітохімії, фармакології та біоінформатики. Окреслено підходи до використання рослин як альтернативи в біотехнології рекомбінантних біомолекул. Встановлення інноваційних напрямів використання лікарських рослин дозволить підвищити успішність відкриття лікарських засобів для лікування поширених і орфанних захворювань, зменшити вартість розробки рослинних препаратів, скоротити шлях біологічно активних сполук від дослідження до виробництва і застосування в практичній медицині.

References

Література

- | | |
|---|--|
| <p>1. Chaachouay, N., Zidane, L. (2024). Plant-Derived Natural Products: A Source for Drug Discovery and Development. <i>Drugs and Drug Candidates</i>, Vol. 3, № 1, P. 184–207.</p> <p>2. Kreft, H., Jetz, W. (2007). Global patterns and determinants of vascular plant diversity. <i>Proc Natl Acad Sci U S A</i>, Vol. 104, № 14, P. 5925–5930.</p> <p>3. Shendure, J., Findlay, G. M., Snyder, M. W. (2019). Genomic Medicine-Progress, Pitfalls, and Promise. <i>Cell</i>, Vol. 177, № 1, P. 45–57.</p> | <p>1. Chaachouay N., Zidane L. Plant-Derived Natural Products: A Source for Drug Discovery and Development. <i>Drugs and Drug Candidates</i>. 2024. Vol. 3. № 1. P. 184–207.</p> <p>2. Kreft H., Jetz W. Global patterns and determinants of vascular plant diversity. <i>Proc Natl Acad Sci U S A</i>. 2007. Vol. 104. № 14. P. 5925–5930.</p> <p>3. Shendure J., Findlay G. M., Snyder M. W. Genomic Medicine-Progress, Pitfalls, and Promise. <i>Cell</i>. 2019. Vol. 177. № 1. P. 45–57.</p> |
|---|--|

4. Business Research Insights. Primary Manufacturers in Botanical Drug Industry, 2023. URL: <https://www.businessresearchinsights.com/blog/top-5-players-in-botanical-drug-industry-globally-10199>,
5. Dzobo, K. (2022). The Role of Natural Products as Sources of Therapeutic Agents for Innovative Drug Discovery. *Comprehensive Pharmacology*, P. 408–422.
6. Kryshchyshyn, A. P., Kaminsky, D. V., Atamanyuk, D. V., Lesyk, R. B. (2015). Computer technologies in pharmacy – filling in the gaps in Ukrainian Pharm curriculum. *Currents in Pharmacy Teaching and Learning*, Vol. 7, Iss. 4, P. 556–559.
7. Dias, D. A., Urban, S., Roessner, U. (2012). A historical overview of natural products in drug discovery. *Metabolites*, № 2 (2), P. 303–336.
8. Kudria, I. H. (2023). Roslyny v mifolohii i medytsyni [Plants in mythology and medicine]. *Kulturolohichnyi almanakh = Cultural almanac*, No. 3, P. 160–166 [in Ukrainian].
9. Bhambhani, S., Kondhare, K. R., Giri, A. P. (2021). Diversity in Chemical Structures and Biological Properties of Plant Alkaloids. *Molecules*, Vol. 26, № 11, P. 3374.
10. Kishimoto, S., Sato, M., Tsunematsu, Y., Watanabe, K. (2016). Evaluation of Biosynthetic Pathway and Engineered Biosynthesis of Alkaloids. *Molecules*, Vol. 21, № 8, P. 1078.
11. Guo, Z. (2017). The modification of natural products for medical use. *Acta Pharm Sin B*, Vol. 7, № 2, P. 119–136.
12. Nasim, N., Sandeep, I. S., Mohanty, S. (2022). Plant-derived natural products for drug discovery: current approaches and prospects. *Nucleus (Calcutta)*, Vol. 65, № 3, P. 399–411.
13. Wee, J. J., Mee Park, K., Chung, A. S. (2011). Biological Activities of Ginseng and Its Application to Human Health. In: Benzie I. F. F., Wachtel-Galor S., editors. *Herbal Medicine: Biomolecular and Clinical Aspects*. 2nd ed. Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis; Chapter 8.
14. Li, Z., Chen, K., Rose, P., Zhu, Y. Z. (2022). Natural products in drug discovery and development: Synthesis and medicinal perspective of leonurine. *Front Chem*, № 10, P. 1036329.
15. Ferreira, A. M., Sales I., Santos S. A. et al. (2024). Enhanced Antimalarial Activity of Extracts of *Artemisia annua* L. Achieved with Aqueous Solutions of Salicylate
4. Primary Manufacturers in Botanical Drug Industry, 2023. *Business Research Insights*. URL: <https://www.businessresearchinsights.com/blog/top-5-players-in-botanical-drug-industry-globally-10199>.
5. Dzobo K. The Role of Natural Products as Sources of Therapeutic Agents for Innovative Drug Discovery. *Comprehensive Pharmacology*. 2022. P. 408–422.
6. Kryshchyshyn A. P., Kaminsky D. V., Atamanyuk D. V., Lesyk R. B. Computer technologies in pharmacy – filling in the gaps in Ukrainian Pharm curriculum. *Currents in Pharmacy Teaching and Learning*. 2015. Vol. 7, Iss. 4. P. 556–559.
7. Dias D. A., Urban S., Roessner U. A historical overview of natural products in drug discovery. *Metabolites*. 2012. № 2 (2). P. 303–336.
8. Кудря І. Г. Рослини в міфології і медицині. *Культурологічний альманах*. 2023. № 3. С. 160–166.
9. Bhambhani S., Kondhare K. R., Giri A. P. Diversity in Chemical Structures and Biological Properties of Plant Alkaloids. *Molecules*. 2021. Vol. 26, № 11. P. 3374.
10. Kishimoto S., Sato M., Tsunematsu Y., Watanabe K. Evaluation of Biosynthetic Pathway and Engineered Biosynthesis of Alkaloids. *Molecules*. 2016. Vol. 21, № 8. P. 1078.
11. Guo Z. The modification of natural products for medical use. *Acta Pharm Sin B*. 2017. Vol. 7, № 2. P. 119–136.
12. Nasim N., Sandeep I. S., Mohanty S. Plant-derived natural products for drug discovery: current approaches and prospects. *Nucleus (Calcutta)*. 2022. Vol. 65, № 3. P. 399–411.
13. Wee J. J., Mee Park K., Chung A. S. Biological Activities of Ginseng and Its Application to Human Health. In: Benzie I. F. F., Wachtel-Galor S., editors. *Herbal Medicine: Biomolecular and Clinical Aspects*. 2nd ed. Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis, 2011. Chapter 8.
14. Li Z., Chen K., Rose P., Zhu Y. Z. Natural products in drug discovery and development: Synthesis and medicinal perspective of leonurine. *Front Chem*. 2022. № 10. P. 1036329.
15. Ferreira A. M., Sales I., Santos S. A. et al. Enhanced Antimalarial Activity of Extracts of *Artemisia annua* L. Achieved with Aqueous

- Salts and Ionic Liquids. *Chem Bio Eng.*, Vol. 1, № 1, P. 44–52.
16. Hao, D. C., Xiao, P. G. (2020). Pharmaceutical resource discovery from traditional medicinal plants: Pharmacophylogeny and pharmacophylogenomics. *Chin Herb Med.*, Vol. 12, № 2, P. 104–117.
17. Bouali, A., Spissu, Y., Barberis, A. et al. (2024). Phytochemical evaluation and exploration of some biological activities of aqueous and ethanolic extracts of two species of the genus *Plantago L.* *PLoS One*, Vol. 19, № 2, P. 0298518.
18. Stavrakov, G., Philipova, I., Lukarski, A. et al. (2020). Galantamine-Curcumin Hybrids as Dual-Site Binding Acetylcholinesterase Inhibitors. *Molecules*, Vol. 25, № 15, P. 3341.
19. Bisht, D., Kumar, D., Kumar, D. et al. (2021). Phytochemistry and pharmacological activity of the genus *artemisia*. *Arch. Pharm. Res.*, Vol. 44, P. 439–474.
20. Batiha, G. E., Olatunde, A., El-Mleeh, A. et al. (2020). Bioactive Compounds, Pharmacological Actions, and Pharmacokinetics of Wormwood (*Artemisia absinthium*). *Antibiotics (Basel)*, Vol. 9, № 6, P. 353.
21. Mayr, F., Möller, G., Garscha, U. et al. (2020). Finding New Molecular Targets of Familiar Natural Products Using In Silico Target Prediction. *Int J Mol Sci.*, Vol. 21, № 19, P. 7102.
22. Wani, M. C., Horwitz, S. B. (2014). Nature as a remarkable chemist: a personal story of the discovery and development of Taxol. *Anticancer Drugs*, Vol. 25, № 5, P. 482–489.
23. Cochrane Library. *cochrane.org*. URL: <https://www.cochranelibrary.com/>
24. Forrest, I., Parker, C. G. (2023). Proteome-Wide Fragment-Based Ligand and Target Discovery. *Isr J Chem.*, Vol. 63, № 3–4, P. 202200098.
25. Arora, S., Chettri, S., Percha, V. et al. (2023). Artificial intelligence: a virtual chemist for natural product drug discovery. *J Biomol Struct Dyn.*, P. 1–10.
26. Fang, J., Liu, C., Wang, Q. et al. (2018). In silico polypharmacology of natural products. *Brief Bioinform.*, Vol. 19, № 6, P. 1153–1171.
27. Grisoni, F., Merk, D., Friedrich, L., Schneider, G. (2019). Design of Natural-Product-Inspired Multitarget Ligands by Machine Learning. *ChemMedChem.*, Vol. 14, № 12, P. 1129–1134.
28. Nogales, C., Mamdouh, Z. M., List, M. et al. (2022). Network pharmacology: curing causal mechanisms instead
- Solutions of Salicylate Salts and Ionic Liquids. *Chem Bio Eng.* 2024. Vol. 1. № 1. P. 44–52.
16. Hao D. C., Xiao P. G. Pharmaceutical resource discovery from traditional medicinal plants: Pharmacophylogeny and pharmacophylogenomics. *Chin Herb Med.* 2020. Vol. 12. № 2. P. 104–117.
17. Bouali A., Spissu Y., Barberis A. et al. Phytochemical evaluation and exploration of some biological activities of aqueous and ethanolic extracts of two species of the genus *Plantago L.* *PLoS One*. 2024. Vol. 19, № 2. P. 0298518.
18. Stavrakov G., Philipova I., Lukarski A. et al. Galantamine-Curcumin Hybrids as Dual-Site Binding Acetylcholinesterase Inhibitors. *Molecules*. 2020. Vol. 25, № 15. P. 3341.
19. Bisht D., Kumar D., Kumar D. et al. Phytochemistry and pharmacological activity of the genus *artemisia*. *Arch. Pharm. Res.* 2021. Vol. 44. P. 439–474.
20. Batiha G. E., Olatunde A., El-Mleeh A. et al. Bioactive Compounds, Pharmacological Actions, and Pharmacokinetics of Wormwood (*Artemisia absinthium*). *Antibiotics (Basel)*. 2020. Vol. 9, № 6. P. 353.
21. Mayr F., Möller G., Garscha U. et al. Finding New Molecular Targets of Familiar Natural Products Using In Silico Target Prediction. *Int J Mol Sci.* 2020. Vol. 21, № 19. P. 7102.
22. Wani M. C., Horwitz S. B. Nature as a remarkable chemist: a personal story of the discovery and development of Taxol. *Anticancer Drugs*. 2014. Vol. 25. № 5. P. 482–489.
23. Cochrane Library. *cochrane.org*. URL: <https://www.cochranelibrary.com/>
24. Forrest I., Parker C. G. Proteome-Wide Fragment-Based Ligand and Target Discovery. *Isr J Chem.* 2023. Vol. 63. № 3–4. P. 202200098.
25. Arora S., Chettri S., Percha V. et al. Artificial intelligence: a virtual chemist for natural product drug discovery. *J Biomol Struct Dyn.* 2023. P. 1–10.
26. Fang J., Liu C., Wang Q. et al. In silico polypharmacology of natural products. *Brief Bioinform.* 2018. Vol. 19, № 6. P. 1153–1171.
27. Grisoni F., Merk D., Friedrich L., Schneider G. Design of Natural-Product-Inspired Multitarget Ligands by Machine Learning. *ChemMedChem.* 2019. Vol. 14, № 12. P. 1129–1134.
28. Nogales C., Mamdouh Z. M., List M. et al. Network pharmacology: curing causal

- of treating symptoms. *Trends Pharmacol Sci.*, Vol. 43, № 2, P. 136–150.
29. Yan, W., Fanying, D., Shiqi, L., Yingli, W. (2024). Network pharmacology and experimental validation to reveal the pharmacological mechanisms of Sini decoction against renal fibrosis. *J Tradit Chin Med.*, Vol. 44, № 2, P. 362–372.
30. Han, L., Lin, G., Li, J. et al. (2024). Network pharmacology and transcriptomic profiling elucidate the therapeutic effects of *Ranunculus ternatus* Thunb on liver fibrosis via MK3-NF- κ B inhibition. *Aging (Albany NY)*, Vol. 16, № 5, P. 4759–4777.
31. Zhang, Y., Wang, T., Song, Y. et al. (2024). Mechanism of Bazi Bushen capsule in delaying the senescence of mesenchymal stem cells based on network pharmacology and experimental validation. *Heliyon*, Vol. 10, № 6, P. 27646.
32. Zhang, R., Zhu, X., Bai, H., Ning, K. (2019). Network Pharmacology Databases for Traditional Chinese Medicine: Review and Assessment. *Front Pharmacol*, Vol. 10, P. 123.
33. Schillberg, S., Finnern, R. (2021). Plant molecular farming for the production of valuable proteins – Critical evaluation of achievements and future challenges. *J Plant Physiol.*, Vol. 258–259, P. 153359.
34. Shanmugaraj, B., Jirarojwattana, P., Phoolcharoen, W. (2023). Molecular Farming Strategy for the Rapid Production of Protein-Based Reagents for Use in Infectious Disease Diagnostics. *Planta Med.*, Vol. 89, № 10, P. 1010–1020.
35. Parthiban, S., Vijeesh, T., Gayathri, T. et al. (2023). Artificial intelligence-driven systems engineering for next-generation plant-derived biopharmaceuticals. *Front Plant Sci.*, Vol. 14, P. 1252166.
36. Capell, T., Twyman, R. M., Armario-Najera, V. et al. (2020). Potential Applications of Plant Biotechnology against SARS-CoV-2. *Trends Plant Sci.*, Vol. 25, № 7, P. 635–643.
37. Shanmugaraj, B. I., Bulaon, C. J., Phoolcharoen, W. (2020). Plant Molecular Farming: A Viable Platform for Recombinant Biopharmaceutical Production. *Plants (Basel)*, Vol. 9, № 7, P. 842.
38. Tekoah, Y., Shulman, A., Kizhner, T. (2015). Large-scale production of pharmaceutical proteins in plant cell culture-the Protalix experience. *Plant Biotechnol J.*, Vol. 13, № 8, P. 1199–1208.
- mechanisms instead of treating symptoms. *Trends Pharmacol Sci.* 2022. Vol. 43, № 2. P. 136–150.
29. Yan W., Fanying D., Shiqi L., Yingli W. Network pharmacology and experimental validation to reveal the pharmacological mechanisms of Sini decoction against renal fibrosis. *J Tradit Chin Med.* 2024. Vol. 44, № 2. P. 362–372.
30. Han L., Lin G., Li J. et al. Network pharmacology and transcriptomic profiling elucidate the therapeutic effects of *Ranunculus ternatus* Thunb on liver fibrosis via MK3-NF- κ B inhibition. *Aging (Albany NY)*. 2024. Vol. 16, № 5. P. 4759–4777.
31. Zhang Y., Wang T., Song Y. et al. Mechanism of Bazi Bushen capsule in delaying the senescence of mesenchymal stem cells based on network pharmacology and experimental validation. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, № 6. P. 27646.
32. Zhang R., Zhu X., Bai H., Ning K. Network Pharmacology Databases for Traditional Chinese Medicine: Review and Assessment. *Front Pharmacol*. 2019. Vol. 10. P. 123.
33. Schillberg S., Finnern R. Plant molecular farming for the production of valuable proteins – Critical evaluation of achievements and future challenges. *J Plant Physiol.* 2021. Vol. 258–259. P. 153359.
34. Shanmugaraj B., Jirarojwattana P., Phoolcharoen W. Molecular Farming Strategy for the Rapid Production of Protein-Based Reagents for Use in Infectious Disease Diagnostics. *Planta Med.* 2023. Vol. 89, № 10. P. 1010–1020.
35. Parthiban S., Vijeesh T., Gayathri T. et al. Artificial intelligence-driven systems engineering for next-generation plant-derived biopharmaceuticals. *Front Plant Sci.* 2023. Vol. 14. P. 1252166.
36. Capell T., Twyman R. M., Armario-Najera V. et al. Potential Applications of Plant Biotechnology against SARS-CoV-2. *Trends Plant Sci.* 2020. Vol. 25. № 7. P. 635–643.
37. Shanmugaraj B. I., Bulaon C. J., Phoolcharoen W. Plant Molecular Farming: A Viable Platform for Recombinant Biopharmaceutical Production. *Plants (Basel)*. 2020. Vol. 9, № 7. P. 842.
38. Tekoah Y., Shulman A., Kizhner T. Large-scale production of pharmaceutical proteins in plant cell culture-the Protalix experience. *Plant Biotechnol J.* 2015. Vol. 13, № 8. P. 1199–1208.

39. Rybicki, E. P. (2020). Plant molecular farming of virus-like nanoparticles as vaccines and reagents. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol*, Vol. 12, № 2, P. 1587.
40. Hood, E. E., Kusnadi, A., Nikolov, Z., Howard, J. A. (1999). Molecular Farming of Industrial Proteins from Transgenic Maize. In: Shahidi, F., Kolodziejczyk, P., Whitaker, J. R., Munguia, A. L., Fuller, G. (eds.). *Chemicals via Higher Plant Bioengineering. Advances in Experimental Medicine and Biology*, Vol. 464. Springer, Boston, MA.
39. Rybicki E. P. Plant molecular farming of virus-like nanoparticles as vaccines and reagents. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol*. 2020. Vol. 12, № 2. P. 1587.
40. Hood E. E., Kusnadi A., Nikolov Z., Howard J. A. Molecular Farming of Industrial Proteins from Transgenic Maize. In: Shahidi F., Kolodziejczyk P., Whitaker J. R., Munguia A. L., Fuller G. (eds.). *Chemicals via Higher Plant Bioengineering. Advances in Experimental Medicine and Biology*. Vol. 464. Springer, Boston, MA, 1999.

NIKITINA OLHA

PhD in Biology, Associate Professor,
Faculty of Chemical and Biopharmaceutical
Technologies, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6994-4294>
E-mail: nikitinap1046@gmail.com

ROBAK ANNA

3rd-level graduate,
Faculty of Chemical and Biopharmaceutical
Technologies, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: anrbko6@ukr.net

TSYBA DANIYIL

3rd-level graduate,
Faculty of Chemical and Biopharmaceutical Technologies,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: tsyba2002@gmail.com

NIKITINA O. O., ROBAK A. Yu., TSYBA D. S.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**INNOVATIVE APPROACHES TO THE USE OF MEDICINAL
PLANTS IN MODERN PHARMACY**

The purpose is to study approaches to the involvement of plants in the technology of production of pharmaceutical preparations. To conduct an analysis of ways of innovative use of plants in modern chemical-pharmaceutical and biopharmaceutical technologies.

Methodology. General scientific and special methods of analysis and synthesis were used to study scientific and scientific-practical works of domestic and foreign scientists on studying ways of innovative use of plants in modern pharmaceuticals and abstract-logical ones when drawing conclusions.

Results. Modern approaches to the discovery of herbal medicines are analyzed, relating to the search for promising botanical objects, the methodology for the extraction and separation of natural compounds, new concepts for establishing pharmacological action based on plant pharmacophylogeny, polypharmacology and network pharmacology. Examples of modern natural compounds are given - leaders of plant origin, which are used in evidence-based medicine and are the basis for the creation of new medicines, as well as Internet database resources for establishing the target pharmacology of plant compounds. The use of molecular plant farming as an alternative in the biotechnology of recombinant biomolecules is indicated.

Scientific novelty. A transdisciplinary approach to using the potential of medicinal plants in the development of innovative drugs involving ethnopharmacology, plant chemosystematics, phytochemistry, pharmacology and bioinformatics is substantiated.

Practical significance. Establishing innovative areas for the use of medicinal plants will increase the success of the discovery of drugs for the treatment of common and orphan diseases, reduce the cost of developing herbal drugs, and reduce the travel time of biologically active compounds from research to production and use in practical medicine.

Keywords: herbal medicines; innovative directions; databases; pharmaceuticals; pharmacophylogeny; polypharmacology; network pharmacology; molecular plant farming.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.10>

УДК 678.743.22

САВЧУК А. П., СОБА Н. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ПЕРЕРОБКА ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОЇ ЕКОНОМІКИ

Мета. Визначення сучасного стану переробки ПВХ відходів та пошук напрямків адаптації технологій переробки ПВХ до сучасних вимог циклічної економіки.

Методика. Використано методи літературно-системного аналізу наукових публікацій за тематикою дослідження та узагальнення отриманих результатів дослідження.

Результати. Розглянуто стан питання застосування полімерних матеріалів та переробки полімерних відходів у світі. Проведено аналіз існуючих способів отримання полівінілхлориду та наведено можливі сфери застосування кожного способу. Розглянуто основні рецептурні склади ПВХ композицій для виготовлення жорстких та м'яких виробів. Описано вплив різних типів добавок на експлуатаційні властивості виробів з ПВХ. Проаналізовано існуючі способи переробки ПВХ композицій в готові вироби. Наведено статистичні дані щодо сфер застосування виробів з ПВХ в різних країнах. Проведено детальний аналіз щодо джерел утворення відходів полівінілхлориду та наведено їх основні характеристики. Систематизовано існуючі способи переробки різних видів відходів ПВХ. Проаналізовано переваги та недоліки існуючих технологій. Запропоновано сучасні підходи до організації процесів переробки відходів полівінілхлориду.

Наукова новизна. Запропоновано принципи переробки відходів полівінілхлориду, засновані на їх фізичній модифікації, які задовольняють потреби циклічної економіки.

Практична значимість. Систематизовано дані щодо джерел утворення відходів полівінілхлориду, наведено можливі способи їх переробки. Проаналізовано переваги та недоліки існуючих технологій та способів переробки відходів ПВХ. Запропоновано впровадження циклічного способу переробки відходів ПВХ, шляхом розробки нових та коректування існуючих рецепту ПВХ композицій щодо збільшення вмісту термостабілізуючих добавок та застосування добавок з пролонгованим впливом.

Ключові слова: полівінілхлорид; циклічна економіка; переробка; полімерні відходи.

Вступ. Полімери та полімерні матеріали є однією з сучасних світових промислових інновацій, яка застосовується у багатьох галузях, таких як пакування, електричне та електронне обладнання, будівництво, сільське господарство, охорона здоров'я та автомобілебудування. Завдяки своїй легкій, міцній, багатоцільовій природі та простоті в обробці, їх виробництво за останні 60 років значно зросло, досягнувши приблизно 400,3 млн т до 2023 року, з прогнозом подвоєння цієї кількості до 2050 року [1–3]. Щороку у світі виробляється близько 350 мільйонів тонн пластикових відходів [4]. Ефективне поводження з пластиковими відходами має важливе значення для побудови сталих і придатних для життя міст. Однак у багатьох країнах, що розвиваються, належне поводження з відходами залишається проблемою, що призводить до неналежної та неконтрольованої практики утилізації [5]. Такі фактори, як погана інфраструктура поводження з відходами та застосування недосконалих технологій переробки, у поєднанні з недостатньою обізнаністю населення та відсутністю стимулів, призвели до того, що пластикові відходи стали повсюдним явищем у навколишньому середовищі [4, 6]. Приблизно 78% що складає 6,3 гігатон пластикових відходів, які коли-небудь вироблялися, були захоронені на звалищах або деінде в навколишньому середовищі [2]. Це становить серйозну загрозу для довкілля та здоров'я людей і створює величезну втрачену можливість створення цінної вторинної сировини з цього ресурсу. Пластмаси можуть розкладатися дуже довго, а це означає, що вони залишаються в навколишньому середовищі, завдаючи шкоди біорізноманіттю та екосистемі, а також призводять до соціальних та економічних втрат [7]. Наприклад, пластик, що заплутався в

коралових рифах в Азійсько-Тихоокеанському регіоні, може спричинити стрес для коралів, через дефіцит світла, виділення токсинів. Це може збільшити ймовірність спалахів хвороб, що загрожує екосистемам, які забезпечують їжу, захист узбережжя, дохід і культурні блага для понад 275 мільйонів людей [8]. Коли пластик руйнується, він розпадається на крихітні шматочки, які називаються мікропластиком. Мікропластик непомітний у навколишньому середовищі, але може мати далекосяжні наслідки [7]. Він може завдавати фізичної та токсикологічної шкоди при потраплянні в організм біоти або при вдиханні, а також може потрапляти в харчовий ланцюг, що потенційно може призвести до шкідливого впливу на здоров'я людини [9] через біоаккумуляцію та хронічний вплив [10]. Приблизно 1,7 мільйона тонн пластикових відходів у світі потрапляє у океан [4], і якщо лінійна економічна модель «бери-виробляй-використовуй-утилізуй» продовжуватиме переважати, то до 2050 року в океанах буде більше пластику за вагою, ніж риби [1]. Як наслідок, пластикові відходи розглядаються як серйозна проблема поводження з твердими побутовими відходами, що займає одне з перших місць у глобальному політичному порядку [11].

Не зважаючи на недоліки, пластики це невід'ємна складова сучасного світу. Серед великого різноманіття пластиків одним з найбільш вживаних є полівінілхлорид. З полівінілхлориду отримують вироби широкого застосування від ізоляції кабелю до медичних виробів. Велика частка виробів з полівінілхлориду є виробами довгострокового вжитку з терміном служби 10–40 років. І найближчим часом очікується значне збільшення утворення таких відходів ПВХ. Полівінілхлорид помилково вважається складним для переробки через його високу в'язкість та схильність до деструкції під час переробки. Однак існує низка методів хімічної та фізичної модифікації ПВХ які постійно вдосконалюються. Найбільш масовою є хімічна модифікація або стабілізація ПВХ, що передбачає введення хімічно активних сполук, котрі впливають на механізм розкладу полімеру. Менш розповсюдженою є фізична модифікація, котра передбачає введення сполук, що впливають на реологічні та адгезійні властивості. ПВХ надзвичайно рідко підлягає переробці в немодифікованому стані. Стабілізатори та модифікатори вводять в полімер ще на стадії виробництва, але основна модифікація здійснюється на стадії формулювання рецептурного складу. Сполуки, котрі використовуються для стабілізації та модифікації ПВХ за звичай значно коштовні за полімер і використовуються в рецептурному складі згідно різних підходів. Найбільш вживаний підхід – введення мінімально можливого вмісту для забезпечення переробки та низької собівартості. Вторинна переробка при цьому має бути забезпечена завдяки рестабілізації. Враховуючи цілі циклічної економіки більш доцільним є підхід в надлишковій стабілізації та модифікації, котрий забезпечить стабільну та надійну придатність до повторної переробки. Дослідження стабілізації та модифікації ПВХ в умовах багаторазової переробки відомі з літературних джерел [12], в загальному вони мають на меті встановити кількість циклів переробки до настання критичної зміни властивостей полімеру. Вимогою сучасності є багаторазова переробка та повне збереження властивостей, застосування умов часткової переробки вторинної та первинної сировини та застосування наповнювачів.

Метою досліджень є визначення сучасного стану переробки ПВХ відходів та пошук напрямків адаптації технологій переробки ПВХ до сучасних вимог циклічної економіки.

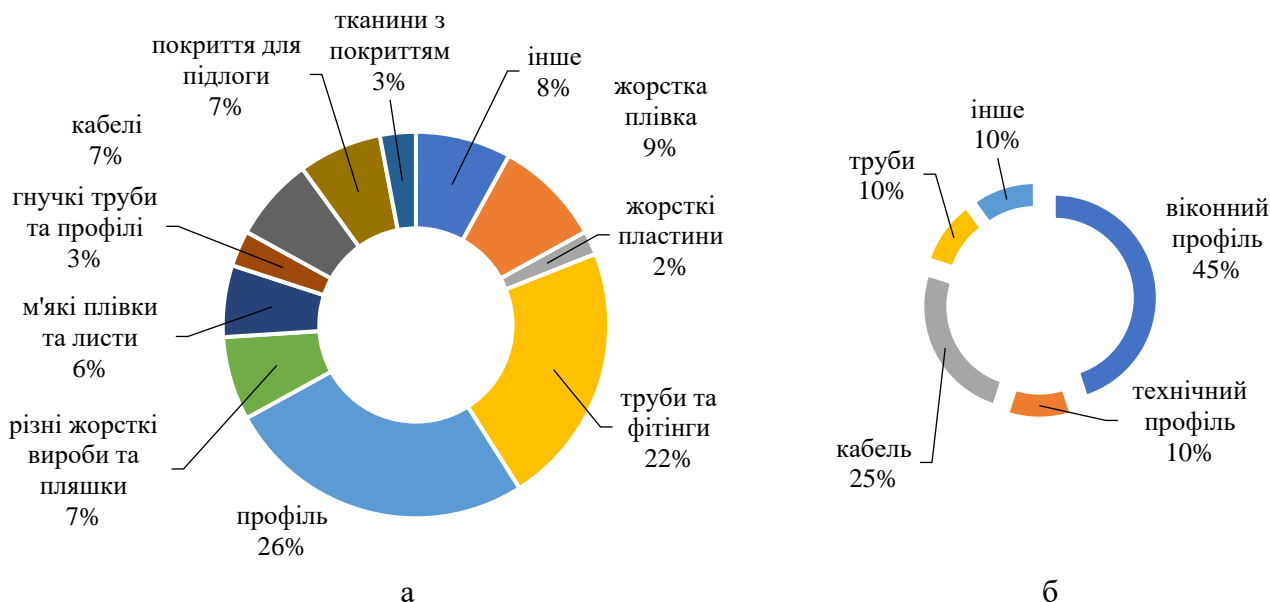
Полівінілхлорид. Полівінілхлорид – популярний пластик, що має тривалий термін служби та хороші механічні, електричні, хімічні та термічні властивості. В залежності від способу отримання, рецептури і технології переробки можна отримати широкий асортимент ПВХ виробів: твердих та м'яких, прозорих та зафарбованих у будь який колір, виробів що експлуатуються у температурному діапазоні -50 до +80°C. До 2023 року у Європі вироблялося близько 5,9 мільйонів тонн на рік [12].

Вініл хлорид є одним із вихідних матеріалів, що використовується для синтезу ПВХ. У результаті лише 43% полімерної маси надходить із нафтохімічної сировини. Низький

вуглецевий слід ПВХ виробів з тривалим терміном служби є додатковою екологічною перевагою. Наприклад, вуглецевий слід стадії виробництва та всього життєвого циклу виробів з ПВХ може бути значно нижчим порівняно з іншими матеріалами, навіть тими, які зазвичай вважаються екологічно чистими [13–15].

Високе економічне значення ПВХ є наслідком не тільки його низьких витрат на виробництво, але в першу чергу визначається його хорошими властивостями, найважливішими з яких є висока хімічна стійкість і сприятливі механічні властивості, а також стійкість до води та погодних умов. Висока прозорість цього полімеру означає, що він використовується у виробництві фольги, блістерів або світлопроникних панелей. ПВХ демонструє численні унікальні додаткові характеристики, такі як стійкість до утворення біоплівки [16], висока ударна міцність, універсальна модифікація гнучкості, здатність до блиску та легкість зв'язування. Він класифікується як матеріал, що самостійно виділяється (LOI твердого ПВХ становить приблизно 44–49%) [17]. Завдяки можливому застосуванню значних кількостей пластифікаторів це дозволяє отримати тверді та м'які варіанти, які значно відрізняються за температурою склування та гнучкістю при певній робочій температурі [18].

Застосування ПВХ. ПВХ використовується в будівництві, автомобільній, трубопровідній і кабельній промисловості, включаючи багато побутових товарів. ПВХ міцний, довговічний, легкий і універсальний. ПВХ це ідеальний матеріал для багатьох застосувань. Понад 75% загального обсягу ПВХ використовується в промисловості, особливо в будівництві (рис. 1), де вироби з ПВХ мають тривалий термін служби – понад 10 років. Будівництво, автомобільна промисловість, пакувальна промисловість та електроніка є основними секторами, де ПВХ-пластик використовується в Європі [19]. Наприклад, понад 60% виробництва ПВХ у Західній Європі використовується тільки в будівлях і будівельному секторі [20].



Джерело: [21].

Рис. 1. Сфери застосування ПВХ та їх розподіл: (а) ЄС; (б) Україна

ПВХ добавки. Рецептури ПВХ містять велику кількість добавок, які виконують важливі функції під час їх переробки та регулюють експлуатаційні властивості кінцевої продукції. До таких добавок відносяться пластифікатори, наповнювачі, пігменти та барвники, термостабілізатори та стабілізатори від ультрафіолету, модифікатори ударної стійкості, антиблокуючі агенти, роздільні агенти, агенти ковзання, антистатики, антипірени,

лубриканти, процесінгові добавки, модифікатори температури теплової деформації та температури розм'якшення Віка, спінювачі та промоутери, засоби проти запотівання, агенти зшивання, промоутери адгезії, відбілювачі, біоциди та фунгіциди, магнітні добавки, флексибілізатори, ядроутворюючі агенти або агенти підвищення кристалічності [22]. Приклади рецептури жорсткого ПВХ наведені у таблицях (табл. 1–4).

Таблиця 1

Рецептура жорсткої ПВХ композиції (віконний профіль)

Компонент	Марка	Кількість, мас. частини
ПВХ	K70	100
Крейда	-	5
Стабілізатор, кальцій/цинк	BP MC 91424 FP/1	3,5
Модифікатор ударостійкості, акрил	DL 55	5
Модифікатор переробки, акрил середньої молекулярної маси	DL 125	0,5
Оксид титану	Kronos 1220	2,5

Таблиця 2

Рецептура частково пластифікованої ПВХ композиції (кутник будівельний з перфорацією)

Компонент	Марка	Кількість, мас. частини
ПВХ	K67	100
Крейда	-	60
Стабілізатор, свинець	BP SMS 318 R/5	4
Модифікатор переробки, акрил середньої молекулярної маси	DL 125	0,4
Двуокис титану	R 218	1
Лубрикант зовнішній ПЕ віск	BL R 381	0,4
Лубрикант внутрішній, ефірний віск	BL LTP	0,2
Пластифікатор, ДОТФ	Ergoplast TDO	5

Таблиця 3

Рецептура ПВХ пластикату (кабельна оболонка під О-406)

Компонент	Марка	Кількість, мас. частини
ПВХ	K70	100
Крейда	-	50
Стабілізатор, кальцій цинк	BP MC 92807KA	3
Лубрикант зовнішній, ПЕ віск.	BL R 381	0,2
Епоксидована соєва олія	BL LSA	1,5
Пластифікатор, ДОТФ	Ergoplast TDO	70
Оптичний відбілювач	-	~ 0,1
Борат цинку	-	~ 0,1

Таблиця 4

Рецептура ПВХ пластизолу (покриття робочих рукавиць)

Компонент	Марка	Кількість, мас. частини
ПВХ емульсійний	EP703	100
Крейда	-	25
Пластифікатор, ДОТФ	Ergoplast TDO	70
Епоксидована соєва олія	BL LSA	2
Стабілізатор, кальцій цинк	BS NT 170	0.5

Пластифікатори додають до ПВХ для надання необхідної гнучкості та еластичності виробу. Застосування гнучкого ПВХ включають ізоляцію кабелів, плівку, м'які меблі, м'які іграшки, шланги та мішки для крові. Найпоширенішими пластифікаторами є алкілові ефіри фталевої кислоти, такі як ді-(2-етилгексилфталат) (або скорочено DEHP) тощо, іноді змішані з хлорованим парафіновим маслом. Як для гнучких, так і для жорстких композицій ПВХ потрібні стабілізатори, щоб запобігти тепловим та світловим змінам у молекулярній структурі полімерного ланцюга, що супроводжується виділенням хлористого водню, та призводить до зміни кольору та крихкості. Без додавання стабілізаторів ПВХ швидко деструктує під час процесів екструзії/змішування та в повсякденному використанні. Традиційні стабілізатори містять солі металів, зокрема свинцю, цинку, олова, кальцію та барію та меншою мірою кадмію. Приклади систем стабілізаторів включають сульфати, карбонати, стеарати та лаурати вищевказаних металів.

ПВХ є одним із найбільш вогнестійких полімерів, але лише в жорстких композиціях, які не містять багатьох інших добавок. Додавання інших полімерів або добавок знижує його вогнестійкість настільки, що часто потрібно додавати спеціальні пластифікатори, органічні антипірени або спеціальні наповнювачі. Пластифікований ПВХ повинен містити принаймні 20% вогнезахисного пластифікатора, щоб бути самозатухаючим.

Стабілізатори зазвичай додають у кількості від 1 до понад 8 частин на 100 частин ПВХ, залежно від застосування. Ізоляція кабелю, наприклад, може містити відносно високий рівень стабілізатора свинцю, необхідного для надання максимальної теплової стабільності. Існує дуже широкий вибір систем стабілізації. Фактори, які обумовлюють вибір для певного застосування, окрім вартості та термостабільності готового продукту, включають ризики токсичності (свинець і кадмій не використовуються для харчової упаковки та медичних виробів), прозорість і зовнішній вигляд готового продукту та сумісність з іншими добавками. Інші добавки включають інертні наповнювачі, такі як крейда, пігменти та барвники, спінювачі для надання текстури піни (на шпалерах, шкірозаміннику тощо), мастила для зменшення нагрівання тертям під час екструзії та формування, антипірени та інші полімери, добавки для покращення ударостійкості. Завдяки своїй універсальності як полімер, ПВХ знаходить застосування в дуже широкому діапазоні продуктів, і, таким чином, зустрічається в широкому діапазоні потоків відходів, коли ці продукти досягають кінця свого терміну служби. Тому ПВХ матеріали з такими добавками можуть становити різні ризики для навколишнього середовища та здоров'я. З приходом нових обмежень і правил, небезпечні ПВХ добавки, які використовувалися в минулому, тепер з'являються у потоках відходів і ускладнюють поводження з відходами. Наприклад, переробка матеріалу старого ПВХ часто ускладнюється через постійне припинення використання таких фталатів, як біс-(2-етилгексил)фталат (DEHP), дибутилфталат (DBP), диізобутилфталат (DIBP) та бензилбутилфталат (BBP), які обмежені регламентом ЄС REACH. Спалювання відходів ПВХ історично було проблематичним через утворення діоксинів і твердих відходів, що містять важкі метали. Тим часом у багатьох країнах вивезення і захоронення ПВХ відходів дедалі більше обмежується [23].

Способи переробки ПВХ. До основних способів переробки ПВХ відносять: видувне формування, каландрування, екструзію, інжекційне формування, ламінування, ротаційне формування, виробництво композитів, герметиків, дроту та кабелю, нанесення ПВХ покриттів(паст) на полотно, покриття волокон та нитки, термоформування та спікання.

Видувне формування є основним способом виробництва порожнистих пластмасових виробів. Пляшки та контейнери є основними продуктами видувного формування. Його можна виконувати за допомогою: екструзійно-видувного формування, інжекційно-видувного формування, розтяжного видувного формування. В усіх методах першим етапом є виготовлення заготовки у вигляді преформи, яка на наступному етапі роздувається до готового виробу. Видувне формування найчастіше використовується для кристалічних полімерів (наприклад, ПЕТ), але двоосьове розтягування (орієнтація) також може використовуватися у випадку ПВХ пляшок для покращення їхніх механічних властивостей. ПВХ має кілька важливих властивостей, таких як висока прозорість, чудова кислотостійкість, хороші бар'єрні властивості для кисню та хороша малостійкість. Звичайними недоліками ПВХ є низька температура деформації, низька стійкість до ударів (яку можна покращити), низька термостійкість (яку можна покращити шляхом правильного вибору стабілізаторів) і середня морозостійкість. Типова композиція для видувного формування включає такі компоненти: ПВХ (від низької до середньої молекулярної маси), ударний модифікатор (зазвичай акрил і у відносно високій концентрації), допоміжний засіб для обробки акрилу, внутрішній змащувач, зовнішній змащувач, термостабілізатор.

Каландруванням виготовляють ПВХ плівки, підлогові покриття, підкладки для басейнів, покрівельні мембрани, листи, спінену шкіру. Типова композиція, яка використовується у виробництві каландрованої плівки, включає наступне: ПВХ (від середньої до високої молекулярної маси), пластифікатори (найчастіше фталати), наповнювачі (найчастіше карбонат кальцію), лубриканти (найбільш популярні стеаринова кислота і стеарати), термостабілізатори, вторинні термостабілізатори (епоксидовані масла, фосфіти, а останнім часом натрію перхлорат) багато інших добавок використовуються залежно від застосування плівки та її бажаних властивостей.

Екструзія є найпоширенішим методом переробки ПВХ, особливо через масштабне виробництво профілів, які використовуються у виробництві вікон і дверей та інших будівельних матеріалів. Екструзію з ПВХ виготовляють жалюзі, компаунди, огорожі та настили, віконні та дверні профілі, спінені профілі, прокладки, інтер'єрні профілі, панелі, труби, гнучкі трубки та шланги, дошки, сайдинги, листи.

Екструдовані вироби здебільшого виготовляються без пластифікаторів. Напівжорсткі склади ПВХ композицій використовуються для медичних інструментів і трубок, а гнучкі - для виготовлення прокладок, деяких труб (наприклад, іригаційних труб), деяких медичних інструментів і гідроізоляційних ущільнень.

Інжекційним формуванням виготовляються в основному муфти, фітінги та іграшки.

ПВХ-пластизолі та латекси використовуються у виробництві багатьох корисних продуктів, включаючи захист склотканини, що використовується для зміцнення цементних плит та інших виробів, виробництво дихаючих тканин, сплетених з волокон з ПВХ покриттям, волоконну оптику, тощо.

ПВХ застосовується для виготовлення багатьох композиційних матеріалів із порошковими та волокнистими наповнювачами. До волокнистих відносять целюлозне волокно, а до порошоків – слюду, глину, деревне борошно, сажу, скляні кульки, гідрокальцит, тригідрат оксиду алюмінію, поліпірол і різні наноматеріали, включаючи нанокарбонати кальцію. Ефекти формування композиту не лише обмежуються покращенням механічних властивостей, таких як ударна в'язкість, міцність на розрив та багато інших, але також включають покращення тепло- та електропровідності (технічний вуглець, поліпірол),

зменшення міграції води (пластинчасті наповнювачі, такі як тальк і слюда), підвищення вогнестійкості (тригідрат оксиду алюмінію), і декоративне значення. Виробництво композиційного матеріалу зазвичай вимагає складної рецептури і технології виробництва. Більшість композитів з ПВХ виготовляються шляхом екструзії або лиття під тиском.

ПВХ відходи. Склад відходів відіграє потенційно важливу роль у визначенні викидів у навколишнє середовище під час їх утилізації, і в цьому відношенні ПВХ нічим не відрізняється від інших відходів. Компаунд ПВХ містить ряд добавок, деякі з яких можуть бути доступні для вилугування з полімерної матриці на звалищах. Інші добавки, такі як важкі метали, можуть бути перетворені в більш мобільні форми після спалювання, тоді як органічні добавки, як правило, руйнуються під час спалювання. Тому нам необхідно розуміти основні інгредієнти та склад типових композицій ПВХ, щоб оцінити навантаження на навколишнє середовище для управління відходами ПВХ.

Існує два основних джерела відходів ПВХ: відходи передспоживання та відходи після споживання. До споживчих відходів відносяться як виробничі, так і монтажні відходи (рис. 2). Виробничі відходи, наприклад, залишки партій від екструзійних формувань, а також різні обрізки та відходи від виробництва листів і профілів. Цей матеріал доступний у чистому стані на місці виробництва, і, отже, більшість переробляється всередині виробничого процесу, тому ніколи не потрапляє до зовнішнього потоку відходів. Додаткові передспоживчі відходи утворюються з обрізків, що залишилися, наприклад, після встановлення підлоги та заміни вікон і заміни труб (відходи встановлення). Передспоживчі відходи становлять близько 12% ПВХ-відходів, що виникають на даний момент, і близько 85% з них (приблизно 420 тис. тонн на рік) наразі переробляється.

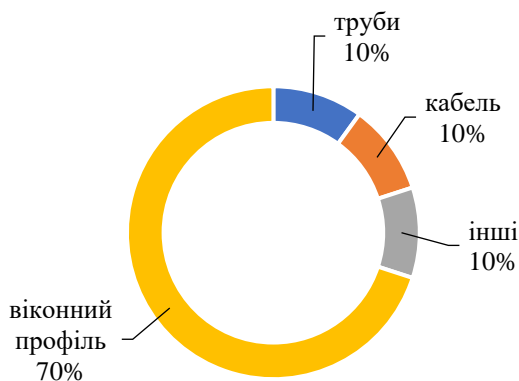


Рис. 2. Розподіл відходів ПВХ в Україні

Переважає джерело відходів ПВХ (близько 88%) – це відходи після споживання. Відходи після споживання складаються з продуктів, які були викинуті в кінці терміну їх використання. Як наслідок, відходи після споживання, як правило, розподіляються у незначній кількості серед великої кількості користувачів і зазвичай вимагають ретельного очищення для видалення забруднень, перш ніж їх можна буде використовувати для переробки. Витрати на збір, сортування та обробку разом роблять витрати на переробку набагато вищими, ніж звичайні варіанти захоронення та спалювання, тому наразі переробляється лише невелика частина (близько 3%) відходів ПВХ після споживання. Деякі відходи після споживання не можливо переробити. Прикладом так відходів можуть бути водопровідні ПВХ труби, які залишаються в землі після заміни. Оцінки відходів базуються на кількості кожного типу продукції, яка, ймовірно, буде утилізована (тобто «доступні» відходи), яка, у свою чергу, базується на історії споживання (виробництво, імпорт та експорт) і передбачуваному терміні служби продукції. Для деяких продуктів із відносно коротким терміном служби (наприклад,

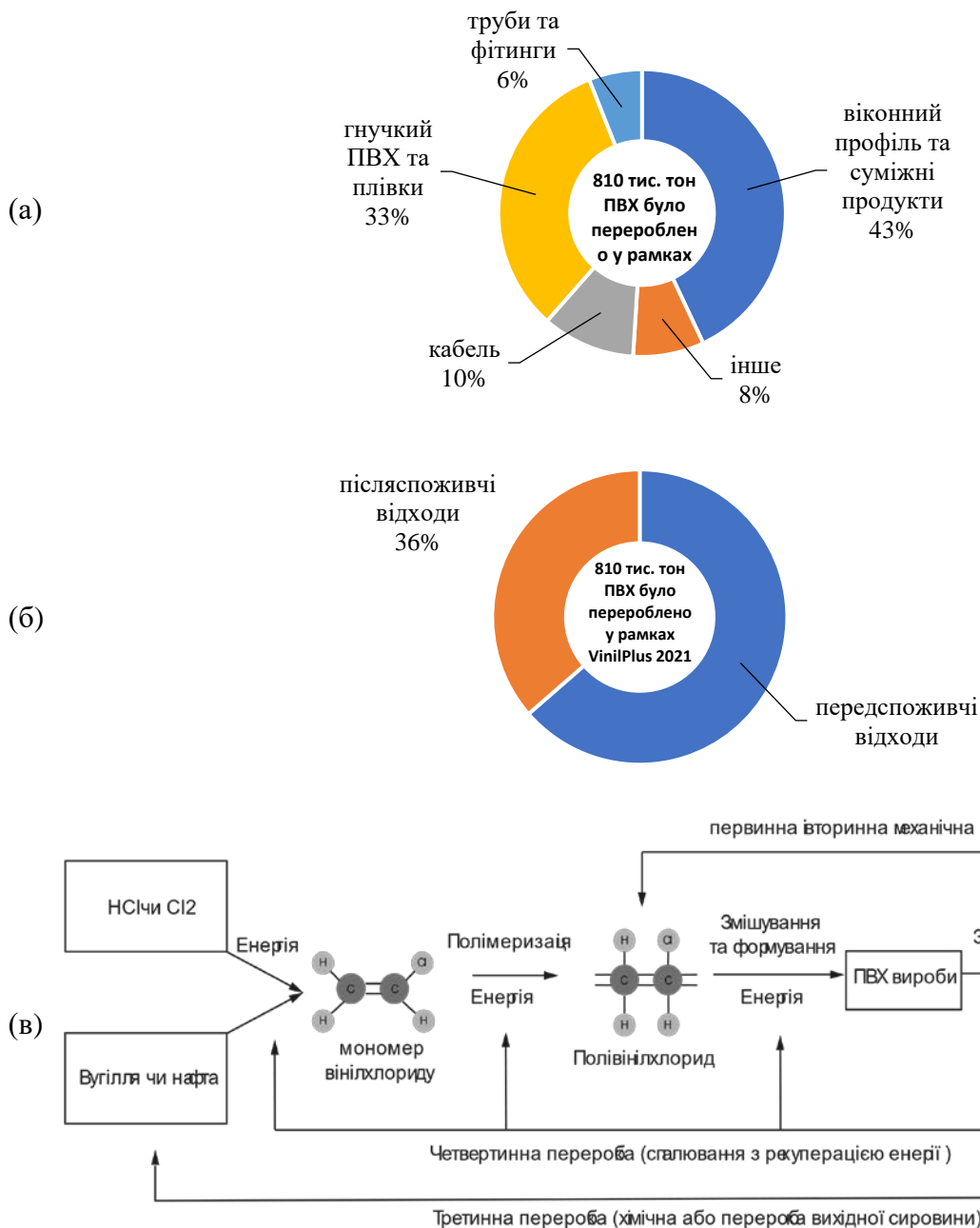
відходи упаковки) більша частина спожитого ПВХ потрапляє у потік відходів протягом одного року після виробництва, тому утворення відходів тісно пов'язане зі структурою споживання. Але для інших продуктів із набагато довшим терміном служби зв'язок між структурою споживання та утворенням відходів є набагато менше зрозумілим. Це відображається співвідношенням утворених відходів до споживання за певний рік. Для короткочасних застосувань, таких як упаковка та побутові відходи, співвідношення перевищує 80%, але знижується нижче 40% для товарів, що застосовуються в електроніці, електротехніці і автомобільних компонентів, лише до 18% – для будівельних застосувань. Діапазон невизначеності загальної кількості відходів ПВХ, що виникає внаслідок цих факторів, оцінюється як +/- 15%.

Незважаючи на політику, яка надає перевагу повторному використанню та переробці, захоронення на сміттєзвалищах залишається основним шляхом утилізації твердих побутових відходів у Європі, на який припадає понад 80% непереробленого матеріалу, причому більшість відходів, що залишилися, йдуть на спалювання, переважно з рекуперацією енергії. Вироби з ПВХ, викинуті в потік побутових і комерційних відходів, швидше за все, підуть тим самим шляхом утилізації, що й тверді побутові відходи, і тому демонструють подібний розподіл між захороненням і спалюванням. Переробка ПВХ значно дорожча для виробника відходів, ніж захоронення на сміттєзвалищі або спалювання, і, отже, рівень переробки зараз дуже низький. Однак плата за утилізацію ПВХ, спаленого разом із твердими побутовими відходами, не відображає повну вартість спалювання, оскільки плата відбувається за набагато більшу кількість реагентів, викидів кислотних газів і залишків, які потребують утилізації, порівняно з твердими побутовими відходами.

Звалище традиційно було найменш витратним варіантом утилізації відходів, але витрати зростають у зв'язку з підвищенням вимог до сміттєзвалищ, для захисту навколишнього середовища. Великі сміттєзвалища сьогодні вимагають великих футеровок, щоб запобігти забрудненню небезпечними речовинами земельних та водних ресурсів і для збору метану, потужного парникового газу, який утворюється в результаті розкладання біовідходів. Спалювання було розроблено в 19 столітті як засіб зменшення маси відходів, які потребують остаточної утилізації, утворюючи в процесі менш небезпечні неорганічні залишки золи для утилізації. На початку 1900-х років спалювання використовувалося як засіб відновлення енергії (тепла або електрики). Лише в Англії до 1912 року працювало близько 76 сміттєспалювальних заводів, які виробляли електроенергію. Початкові цілі спалювання як попередньої обробки для утилізації відходів, а саме стабілізація відходів і зменшення маси, з рекуперацією енергії, де це доречно, залишаються головними цілями сьогодні. Інвестиційні та експлуатаційні витрати на сучасні сміттєспалювальні заводи є значними, але можлива економія на масштабах, оскільки сучасні сміттєспалювальні заводи зазвичай мають потужність від 200 до 1000 тис. тонн на рік. Тому спалювання застосовують у великих агломераціях, утворюючи достатню кількість відходів, щоб зробити його економічно ефективним. Високі витрати на спалювання частково компенсуються продажем енергії, рекуперованої у вигляді тепла та/або електрики, а також продажем переробленого матеріалу, такого як деяка кількість золи та чорних металів, отриманих у процесі спалювання. Менші сміттєспалювальні установки (від 25 до 100 тис. тонн/рік) також широко використовуються для обробки відходів менших, ізольованих громад, але більшість із цих малих сміттєспалювальних установок не рекуперують енергію.

Переробка ПВХ. Управління ПВХ-відходами в Китаї включає звалища, спалювання та переробку [24]. Частка ПВХ-відходів, які розміщуються на смітниках, спалюються та переробляються механічно та хімічно, становлять відповідно 36,0%, 9,3%, 25,5% та 0,8% [25]. Однак сміттєзвалища забруднюють навколишнє середовища і займають багато простору. Крім того, небезпечні добавки можуть вивільнитися і забруднювати ґрунт і підземні води. Також

при спалюванні ПВХ відходів викидаються вуглекислий газ і хлоридна кислота і можуть утворюватися поліхлоровані діоксини та фурани [26]. Залишки містять важкі метали і вважаються небезпечними відходами [27]. Відходи ПВХ зазвичай переробляються в європейських країнах і Японії [28–30]. У 2021 році в рамках VinylPlus було перероблено 810 775 тонн ПВХ-відходів, з яких 63,6% становили відходи попереднього споживання, а 36,4% – відходи після споживання (рис. 3) [31].



Джерело: [31].

Рис. 3. Переробка ПВХ: (а), (б) ПВХ, перероблений у рамках VinylPlus у 2021 році, (в) основні типи переробки ПВХ відходів

Теоретично існує чотири типи переробки (рис. 3, в): первинна (доспоживча) та вторинна (післяспоживча) механічна переробка, третинна переробка та четвертинна переробка [32]. Первинна механічна переробка використовує незабруднений ПВХ – виробничі відходи

для створення нових продуктів. Теоретично ПВХ-відходи можна переробляти за допомогою первинної переробки, яка також називається переробкою в замкнутому циклі. Однак може виникнути багато проблем, таких як вибірковий збір і ручне сортування [32].

Вторинна механічна (післяспоживча) переробка вимагає сортування відходів ПВХ, подрібнення відходів і екструзії [33]. Цей метод переробки більше підходить для твердих і незабруднених відходів ПВХ (наприклад, віконних рам і супутніх виробів, труб та інших твердих матеріалів), але отримані продукти є малоцінними матеріалами [34].

Третинна переробка, а саме хімічна переробка або переробка до сировини, використовується для перетворення відходів ПВХ у хімічні речовини з низькою молекулярною масою, паливо та сировину [35]. Цей спосіб підходить для гнучких, змішаних і забруднених відходів ПВХ, наприклад, покрівлі, покриття, тканини з покриттям, гнучкі плівки. Однак HCl і хлоровані органічні сполуки є побічними продуктами [36, 37].

Четвертинна переробка передбачає спалювання з рекуперацією енергії, яка застосовується майже до всіх відходів ПВХ. Однак при спалюванні виділяється вуглекислий газ і можуть виділятися небезпечні речовини; високі температури необхідні для запобігання утворенню діоксинів [38].

Під час механічної переробки вироби з ПВХ збираються, сортуються та обробляються для отримання вторинної сировини, яка може замінити первинну суміш ПВХ подібного складу та, таким чином, переробляється в подібні продукти, що іноді визначається як «високоякісна переробка». Високоякісна вторинна переробка вимагає високоякісного переробленого матеріалу з дуже низьким ступенем забруднення. Механічна переробка також можлива для забрудненого ПВХ, зазвичай змішаного з іншими пластиками та матеріалами, від яких подальше відокремлення є технічно неможливим або занадто дорогим – наприклад, від тканин з покриттям тощо. Приклади включають пластикові огорожі, дорожні конуси, горщики для рослин і промислові підлоги. Однак можливості перероблення ПВХ з іншими полімерами обмежені необхідністю підтримувати температуру обробки нижче 210 °C, щоб запобігти розкладанню ПВХ. Ця температура надто низька, щоб дозволити змішану переробку з іншими пластиками, такими як поліпропілен, поліамід, полікарбонат і поліетилентерефталат, хоча вона прийнятна для деяких видів поліетилену та полістиролу.

Альтернативою низькоякісній механічній переробці змішаних пластикових відходів є переробка до вихідної сировини, що передбачає термічне руйнування полімерів для отримання вуглеводневої сировини для нафтохімічної промисловості або безпосереднього використання пластикових відходів як відновника в доменних печах. У випадку ПВХ це також вивільняє хлор у формі хлороводню. Згідно з застосовуваною технологією, поточні установки з переробки ПВХ можуть приймати вміст хлору в сировині максимум 10%.

Практика поводження з відходами ПВХ у Північному регіоні (Данія, Швеція, Норвегія та Фінляндія). Регіон відомий високими показниками переробки та передовими екологічними стандартами, а також значною часткою спалювання відходів. Виявлено, що статистика поводження з ПВХ відходами в регіоні є напрочуд поганою. Оцінки щодо утворення відходів ПВХ ненадійні, а офіційні системи звітності в основному відсутні. За винятком Данії та кількох муніципалітетів в інших країнах, немає окремих національних систем збору та переробки ПВХ-відходів після споживання. Окремий збір і переробка існує лише для відходів попереднього споживання, але існують добровільні ініціативи, організовані деякими виробниками/імпортерами підлогових покриттів і труб. Ці системи збирають відносно невелику частку від загальної кількості ПВХ відходів. Набагато більші обсяги ПВХ потрапляють у змішані відходи та зрештою переробляються на заводах з переробки відходів.

Така ситуація ймовірно пов'язана з тим, що вплив відходів ПВХ на навколишнє середовище все ще недостатньо вивчений, що частково формує існуючу національну політику та стратегії управління відходами. Відходи ПВХ складаються з різних типів матеріалів різного

походження, що ускладнює переробку через високі вимоги до якості переробленого матеріалу. Роздільне збирання є дорогим і не дає ефекту масштабу. Тим часом, існуюча надлишкова потужність спалювальної інфраструктури та можливості високотемпературної обробки відповідно до високих стандартів викидів призводять до того, що рекуперація енергії є найпростішим варіантом обробки ПВХ. Збільшення вилучення матеріалів вимагає додаткових політичних втручань, які можуть бути проаналізовані в майбутніх дослідженнях [28].

Також дуже часто під час виробництва, стабілізація ПВХ рецептур відбувається з розрахунку на одну переробку, це призводить до зниження собівартості ПВХ продукції та збільшення доходів компанії, але в довгостроковій перспективі така стратегія веде до накопичення великої кількості відходів ПВХ виробів, які повторно стабілізувати і повторно переробити стає на порядок складніше та енергозатратніше. Такі ПВХ вироби зазвичай подрібнюють до порошкоподібного стану та наносять на поверхню стабілізаційні добавки а потім повторно переробляють. Додавання потрібної кількості добавок під час першої переробки ПВХ може вирішити питання багаторазової переробки ПВХ виробів.

Висновки. З кожним роком збільшується попит на продукцію з полівінілхлориду. Як наслідок, економічно виправдано інвестування коштів, спрямованих на підвищення рівня переробки ПВХ відходів. Особливо обґрунтованою є механічна переробка відходів в процесі виробництва ПВХ продукції. Це, безперечно, найпростіший спосіб, оскільки йдеться про матеріал із визначеним складом і властивостями, а відповідна організація виробництва на підприємстві дозволяє в багатьох випадках використовувати вже наявне обладнання. Що стосується пост споживчих відходів, то організація збору відходів, що гарантує доступність і якість сировини, є стратегічним завданням. Також важливим кроком у переробці таких відходів є удосконалення існуючих методів переробки, як наприклад, фізичних способів модифікації, а саме використання оптимальних параметрів стабілізуючих та змашуючих добавок.

Ще одна проблема полягає в тому, щоб відходи ПВХ включали матеріали, вироблені понад 30 років тому, можуть містити вже заборонені технологічні добавки, такі як термостабілізатори на основі сполук свинцю та деякі пластифікатори. Такі відходи ПВХ, які становлять проблему для вторинної переробки, повинні бути піддані переробці вихідної сировини. Однак це вимагає великих інвестиційних витрат, пов'язаних з необхідністю проектування та будівництва відповідних промислових систем. Тим не менш, у прагненні до циркулярної економіки, навіть якщо рентабельність такої переробки буде дуже низькою, інвестиції можуть бути виправданими з екологічних міркувань, а дослідження з їх розробки також можуть принести відчутні фінансові вигоди в майбутньому.

Незважаючи складний та багатогранний комплекс властивостей, ПВХ є матеріалом, який, безперечно, підлягає переробці. Крім того, рівень його переробки зростає з кожним роком. А сучасні способи адаптації технології переробки ПВХ відходів в Україні дозволить у майбутньому переробляти такі відходи в нашій державі з позитивним екологічним і фінансовим ефектом, задовольняючи потреби циклічної економіки.

References

Література

- | | |
|---|--|
| 1. Pilapitiya, P. N. T., Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: a review. <i>Cleaner Materials</i> , 100220. | 1. Pilapitiya P. N. T., Ratnayake A. S. The world of plastic waste: a review. <i>Cleaner Materials</i> . 2024. 100220. |
| 2. Jambeck, J. R., Walker-Franklin, I. (2023). The impacts of plastics' life cycle. <i>One Earth</i> , 6(6), 600–606. | 2. Jambeck J. R., Walker-Franklin I. The impacts of plastics' life cycle. <i>One Earth</i> . 2023. No. 6(6). P. 600–606. |
| 3. Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. <i>Science advances</i> , 3(7), e1700782. | 3. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever |

4. Hannah Ritchie (2023). How much plastic waste ends up in the ocean? *OurWorldInData.org*. URL: <https://ourworldindata.org/how-much-plastic-waste-ends-up-in-the-ocean>.
5. The World Bank (2018). Brief e solid waste management. *World Bank Group*. URL: <http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>.
6. Jambeck, J., Hardesty, B. D., Brooks, A. L., Friend, T., Teleki, K., Fabres, J., ... Wilcox, C. (2018). Challenges and emerging solutions to the land-based plastic waste issue in Africa. *Marine Policy*, 96, 256–263.
7. Boucher, J., Friot, D. (2017). Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources (Vol. 10). Gland, Switzerland: Iucn.
8. Lamb, J. B., Willis, B. L., Fiorenza, E. A., Couch, C. S., Howard, R., Rader, D. N., ... Harvell, C. D. (2018). Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science*, 359(6374), 460–462.
9. Thompson, R. C. (2015). Microplastics in the marine environment: sources, consequences and solutions. *Marine anthropogenic litter*, 185–200.
10. Wright, S. L., Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: a micro issue? *Environmental science & technology*, 51(12), 6634–6647.
11. Rebeiz, K. S., Craft, A. P. (1995). Plastic waste management in construction: technological and institutional issues. *Resources, conservation and recycling*, 15(3–4), 245–257.
12. Lahl, U., Zeschmar-Lahl, B. (2024). More than 30 Years of PVC Recycling in Europe – A Critical Inventory. *Sustainability*, 16(9), 3854.
13. Alsadi, A. (2019). Evaluation of carbon footprint during the life-cycle of four different pipe materials.
14. Alsabri, A., Al-Ghamdi, S. G. (2020). Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports*, 6, 364–370.
15. Jones, M. P., Archodoulaki, V. M., Köck, B. M. (2022). The power of good decisions: Promoting eco-informed design attitudes in plastic selection and use. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106324.
16. James, N. R., Jayakrishnan, A. (2003). Surface thiocyanation of plasticized poly (vinyl chloride) and its made. *Science advances*. 2017. No. 3 (7), e1700782.
4. Hannah Ritchie. How much plastic waste ends up in the ocean? *OurWorldInData.org*. URL: <https://ourworldindata.org/how-much-plastic-waste-ends-up-in-the-ocean>.
5. The World Bank. Brief e solid waste management. *World Bank Group*. 2018. URL: <http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>.
6. Jambeck J., Hardesty B. D., Brooks A. L., Friend T., Teleki K., Fabres J. ... & Wilcox C. Challenges and emerging solutions to the land-based plastic waste issue in Africa. *Marine Policy*. 2018. No. 96. P. 256–263.
7. Boucher J., Friot D. Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources (Vol. 10). Gland, Switzerland: Iucn., 2017.
8. Lamb J. B., Willis B. L., Fiorenza E. A., Couch C. S., Howard R., Rader D. N. ... & Harvell C. D. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science*. 2018. No. 359 (6374). P. 460–462.
9. Thompson R. C. Microplastics in the marine environment: sources, consequences and solutions. *Marine anthropogenic litter*. 2015. P. 185–200.
10. Wright S. L., Kelly F. J. Plastic and human health: a micro issue? *Environmental science & technology*. 2017. No. 51 (12). P. 6634–6647.
11. Rebeiz K. S., Craft A. P. Plastic waste management in construction: technological and institutional issues. *Resources, conservation and recycling*. 1995. No. 15 (3–4). P. 245–257.
12. Lahl U., Zeschmar-Lahl B. More than 30 Years of PVC Recycling in Europe – A Critical Inventory. *Sustainability*. 2024. No. 16 (9). 3854.
13. Alsadi A. Evaluation of carbon footprint during the life-cycle of four different pipe materials. 2019.
14. Alsabri A., Al-Ghamdi S. G. Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports*. 2020. No. 6. P. 364–370.
15. Jones M. P., Archodoulaki V. M., Köck B. M. The power of good decisions: Promoting eco-informed design attitudes in plastic selection and use. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022. No. 182, 106324.
16. James N. R., Jayakrishnan A. Surface thiocyanation of plasticized poly (vinyl

- effect on bacterial adhesion. *Biomaterials*, 24(13), 2205–2212.
17. Mark, J. E. (2007). *Physical Properties of Polymers Handbook* Springer. New York.
18. Wypych, G. A. (2020). ChemTec Publishing: Toronto. ON, Canada.
19. PVC (2018). ECVMPVC for building and construction. URL: <http://www.pvc.org/en/p/pvc-for-building--construction>.
20. VinylPlus (2017). PVC Recycling Technologies. URL: https://vinylplus.eu/uploads/downloads/VinylPlus_Recycling_Technologies_30012017.pdf.
21. Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126.
22. Wypych, George. PVC formulary. ChemTec Publishing, 2020. URL: <https://shop.elsevier.com/books/pvc-formulary/wypych/978-1-927885-63-5>.
23. PlasticsEurope Plastics – the Facts 2017. *An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*, 2017. URL: https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf.
24. Zhao, X., Korey, M., Li, K., Copenhaver, K., Tekinalp, H., Celik, S., ... Ozcan, S. (2022). Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131928.
25. Liu, Y., Zhou, C., Li, F., Liu, H., Yang, J. (2020). Stocks and flows of polyvinyl chloride (PVC) in China: 1980–2050. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104584.
26. Buekens, A., Cen, K. (2011). Waste incineration, PVC, and dioxins. *Journal of material cycles and waste management*, 13, 190–197.
27. Zhang, R. Z., Luo, Y. H., Yin, R. H. (2018). Experimental study on dioxin formation in an MSW gasification-combustion process: An attempt for the simultaneous control of dioxins and nitrogen oxides. *Waste Management*, 82, 292–301.
28. Miliute-Plepiene, J., Frâne, A., Almasi, A. M. (2021). Overview of polyvinyl chloride (PVC) waste management practices in the Nordic countries. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100246.
29. Ciacci, L. U. C. A., Passarini, F. A. B. R. I. Z. I. O., Vassura, I. V. A. N. O. (2017). The European PVC cycle: In-use stock and flows. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104584.
- chloride) and its effect on bacterial adhesion. *Biomaterials*. 2003. No. 24 (13). P. 2205–2212.
17. Mark J. E. *Physical Properties of Polymers Handbook* Springer. New York, 2007.
18. Wypych G. A. ChemTec Publishing: Toronto. ON, Canada, 2020.
19. ECVMPVC for building and construction. *www.pvc.org*. 2018. URL: <http://www.pvc.org/en/p/pvc-for-building--construction>.
20. PVC Recycling Technologies. *VinylPlus*. 2017. URL: https://vinylplus.eu/uploads/downloads/VinylPlus_Recycling_Technologies_30012017.pdf.
21. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. No. 364 (1526). P. 2115–2126.
22. Wypych, George. PVC formulary. *ChemTec Publishing*. 2020. URL: <https://shop.elsevier.com/books/pvc-formulary/wypych/978-1-927885-63-5>.
23. PlasticsEurope Plastics – the Facts 2017. *An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*, 2017. URL: https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf.
24. Zhao X., Korey M., Li K., Copenhaver K., Tekinalp H., Celik S., ... Ozcan S. Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal*. 2022. No. 428, 131928.
25. Liu Y., Zhou C., Li F., Liu H., Yang J. Stocks and flows of polyvinyl chloride (PVC) in China: 1980–2050. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. No. 154, 104584.
26. Buekens A., Cen K. Waste incineration, PVC, and dioxins. *Journal of material cycles and waste management*. 2011. No. 13. P. 190–197.
27. Zhang R. Z., Luo Y. H., Yin R. H. Experimental study on dioxin formation in an MSW gasification-combustion process: An attempt for the simultaneous control of dioxins and nitrogen oxides. *Waste Management*. 2018. No. 82. P. 292–301.
28. Miliute-Plepiene J., Frâne A., Almasi A. M. Overview of polyvinyl chloride (PVC) waste management practices in the Nordic countries. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. No. 4, 100246.
29. Ciacci L. U. C. A., Passarini F. A. B. R. I. Z. I. O., Vassura I. V. A. N. O. The European PVC cycle: In-use stock and flows. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104584.

- In-use stock and flows. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 108–116.
30. Seike, T., Isobe, T., Harada, Y., Kim, Y., Shimura, M. (2018). Analysis of the efficacy and feasibility of recycling PVC sashes in Japan. *Resources, conservation and recycling*, 131, 41–53.
31. VinylPlus (2022). Progress Report. Reporting on 2021 Activities. URL: <https://www.vinylplus.eu/wp-content/uploads/2022/05/VinylPlus-Progress-Report2022.pdf>.
32. Ignatyev, I. A., Thielemans, W., Vander Beke, B. (2014). Recycling of polymers: a review. *ChemSusChem*, 7(6), 1579–1593.
33. Schyns, Z. O., Shaver, M. P. (2021). Mechanical recycling of packaging plastics: A review. *Macromolecular rapid communications*, 42(3), 2000415.
34. Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126.
35. Zhang, F., Wang, F., Wei, X., Yang, Y., Xu, S., Deng, D., Wang, Y. Z. (2022). From trash to treasure: Chemical recycling and upcycling of commodity plastic waste to fuels, high-valued chemicals and advanced materials. *Journal of Energy Chemistry*, 69, 369–388.
36. Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management*, 69, 24–58.
37. Kim, S. H., Kwak, S. Y., Suzuki, T. (2006). Photocatalytic degradation of flexible PVC/TiO₂ nanohybrid as an eco-friendly alternative to the current waste landfill and dioxin-emitting incineration of post-use PVC. *Polymer*, 47(9), 3005–3016.
38. Zhang, M., Buekens, A., Jiang, X., Li, X. (2015). Dioxins and polyvinylchloride in combustion and fires. *Waste Management & Research*, 33(7), 630–643.
- Conservation and Recycling*. 2017. No. 123. P. 108–116.
30. Seike T., Isobe T., Harada Y., Kim Y., Shimura M. Analysis of the efficacy and feasibility of recycling PVC sashes in Japan. *Resources, conservation and recycling*. 2018. No. 131. P. 41–53.
31. Progress Report. Reporting on 2021 Activities. *VinylPlus*. 2022. URL: <https://www.vinylplus.eu/wp-content/uploads/2022/05/VinylPlus-Progress-Report2022.pdf>.
32. Ignatyev I. A., Thielemans W., Vander Beke B. Recycling of polymers: a review. *ChemSusChem*. 2014. No. 7 (6). P. 1579–1593.
33. Schyns Z. O., Shaver M. P. Mechanical recycling of packaging plastics: A review. *Macromolecular rapid communications*. 2021. No. 42 (3), 2000415.
34. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. No. 364 (1526). P. 2115–2126.
35. Zhang F., Wang F., Wei X., Yang Y., Xu S., Deng D., Wang Y. Z. From trash to treasure: Chemical recycling and upcycling of commodity plastic waste to fuels, high-valued chemicals and advanced materials. *Journal of Energy Chemistry*. 2022. No. 69. P. 369–388.
36. Ragaert K., Delva L., Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management*. 2017. No. 69. P. 24–58.
37. Kim S. H., Kwak S. Y., Suzuki T. Photocatalytic degradation of flexible PVC/TiO₂ nanohybrid as an eco-friendly alternative to the current waste landfill and dioxin-emitting incineration of post-use PVC. *Polymer*. 2006. No. 47 (9). P. 3005–3016.
38. Zhang M., Buekens A., Jiang X., Li X. Dioxins and polyvinylchloride in combustion and fires. *Waste Management & Research*. 2015. No. 33 (7). P. 630–643.

SAVCHUK ANDRIY
Postgraduate student,
Department of Chemical Technology
and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-2287-9030>
E-mail: Andriy.pvh@gmail.com

SOVA NADIYA
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Chemical Technology
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

SAVCHUK A. P., SOVA N. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

POLYVINYL CHLORIDE PROCESSING IN A CYCLICAL ECONOMY

Purpose. *Determining the current state of PVC waste processing and finding ways to adapt PVC processing technologies to the current requirements of the circular economy.*

Methodology. *The methods of literary and systematic analysis of scientific publications on the subject of the study and generalization of the obtained research results were used.*

Findings. *The article considers the state of the art of PVC materials use and waste recycling in the world. The existing methods of producing polyvinyl chloride are analyzed and the possible applications of each type of typical formulation are presented. The main formulations of PVC compositions for the manufacture of rigid and soft products are considered. The influence of different types of additives on the performance properties of PVC products is described. The existing methods of processing PVC compositions into finished products are analyzed. Statistical data on the areas of application of PVC products in different countries are presented. A detailed analysis of the sources of polyvinyl chloride waste generation is carried out and their main characteristics are presented. The existing methods of processing various types of PVC waste are systematized. The advantages and disadvantages of existing technologies are analyzed. Modern approaches to the organization of polyvinyl chloride waste recycling processes are proposed.*

Originality. *The principles of polyvinyl chloride processing based on the principles of the circular economy are proposed.*

Practical value. *The data on the sources of polyvinyl chloride waste generation are systematized, and possible ways of their recycling are presented. The advantages and disadvantages of existing technologies and methods of PVC waste processing are analyzed. It is proposed to introduce a cyclic method of processing PVC waste by developing new and adjusting existing recipes for PVC compositions to increase the content of heat-stabilizing additives and the use of additives with prolonged effects.*

Keywords: *polyvinyl chloride; circular economy; recycling; polymeric waste.*

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ЩОДО ПОДАННЯ РУКОПISУ СТАТЕЙ наукового фахового видання «Технології та інжиніринг» (Technologies and Engineering)

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

ПРАВИЛА ПОДАННЯ РУКОПISІВ СТАТЕЙ

Для публікації автори подають в редакцію журналу:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3) Назва файлу: *Прізвище_vidom.docx*;

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

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

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

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

ПОСЛІДОВНІСТЬ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТАТТІ:

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

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

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

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

Порожній рядок.

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

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

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

Порожній рядок.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Порожній рядок.

В кінці надається коротко інформація англійською мовою Times New Roman, кегль – 10 pt, прописні, міжрядковий інтервал – 1, назва рубрик – курсив.

Приклад:

IVANOV YURI

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

<https://orcid.org/0000-0001-8718-1202>

Scopus Author ID: 9134000100

Researcher ID: H-6012-2020

E-mail: обо'язково

Анотація (EN) не менше 1800 знаків.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Статті приймаються на поштову скриньку: vistnuk@knutd.edu.ua.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

Комп'ютерний набір та макетування

КРИВОНОС Олена

Технічний редактор

ПАНАСЮК Ігор

Відповідальний за поліграфічне виконання

ОВЕЧКІНА Лілія

Підп. до друку 19.06.2024. Формат 60×84 1/8.
Ум. друк. арк. 16,72. Облік. вид. арк. 13,10. Наклад 100 пр. Зам..

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 КВ №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 19.06.2024. Format 60×84 1/8.
Conditional sheet 16.72. Calculated sheet 13.10. Circulation 100 copies. Order N .

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.