

ISSN 2786-5371

TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ



Том 27, № 1, 2026



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ТЕХНОЛОГІЇ
ТА
ІНЖИНІРИНГ**

Том 27, № 1, 2026

DOI:10.30857/2786-5371.2026.1

Наукове фахове видання

Періодичність виходу: 6 разів на рік

Дата заснування: грудень 1999 р.

Київ 2026

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).

Том 27, № 1, 2026

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

Журнал зареєстровано як суб'єкт у сфері друкованих медіа – ідентифікатор R30-05423 (Рішення Національної Ради від 08.08.2024 р. №2520).

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, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

Засновник і видавець:

Київський національний університет технологій та дизайну
Україна, 01011, м. Київ, вул. Мала Шияновська, 2

Головний редактор:

Панасюк І.В., д.т.н., професор

**Заступник
головного редактора:**

Злотенко Б. М., д.т.н., професор

**Відповідальний
секретар:**

Кривонос О. О.

Тематична спрямованість журналу «Технології та інжиніринг»: Інформаційні технології, електроніка, механічна та електрична інженерія. Матеріалознавство індустрії моди, технологій виробництва текстилю, одягу та взуття. Хімічні та біофармацевтичні технології.

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

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

01011, м. Київ, вул. Мала Шияновська, 2, корп. 1, к. 1-347

тел./факс: +38 (044) 256-21-39

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну, протокол № 8 від 09.04.2026 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**

Volume 27, Issue 1, 2026

DOI:10.30857/2786-5371.2026.1

Scientific Specialized Edition

Issued: 6 times a year

Founded: December, 1999

Kyiv 2026

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).

Vol. 27, № 1, 2026

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

The magazine is registered as an entity in the field of print media – identifier R30-05423 (Decision of the National Council dated August 8, 2024 No. 2520).

License for publishing activity is ДК №993, originating date 24.07.2002
The journal is listed & reregistered in Higher Attestation Commission of Ukraine: №735 dated 29.06.2021 “Technologies and Engineering” in the list of professional publications: cat. B, technical specialties – 122, 131, 133, 151, 161, 132, 182, 141, 144, 171 (from 2018, 2020).

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online

The journal is registered in ISSN International Centre, Paris.

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

Owner and Publisher:

Kyiv National University of Technologies and Design
Ukraine, 01011, Kyiv, 2, Mala Shyianovska Str.

Editor-in- Chief:

Igor V. Panasiuk – Dr., professor

Deputy Editor:

Borys M. Zlotenko – Dr., professor

Executive secretary:

Olena O. Kryvonos

Scientific fields: Information technologies, electronics, mechanical and electrical engineering. Material science in the textile, clothing and footwear manufacturing industries. Chemical and biopharmaceutical technologies.

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

EDITORIAL OFFICE:

01011, Ukraine, Kyiv, 2, Mala Shyianovska Str., office 1-347

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

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

Recommendations from Science Council of Kyiv National University of Technologies and Design, Protocol № 8, originating date 09.04.2026.

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* (Scopus Author ID: 56672850100, Researcher ID: D-4255-2017, ORCID: 0000-0001-6671-4266).

Злотенко Борис Миколайович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник головного редактора* (Scopus Author ID: 57196146994, ORCID: 0000-0002-0870-8535).

СЕКЦІЯ: ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Плаван Вікторія Петрівна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*. ORCID: 0000-0001-9559-8962.

Мокроусова Олена Романівна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*. ORCID: 0000-0003-1943-8048.

Андрєєва 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.

**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.

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

Ніконов Олег Якович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-8878-4318.

Скідан Владислава Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-8358-9759.

Стаценко Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-3064-3109.

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 Наталя 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.

ЗМІСТ

ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

1. **Білоусова А., Баклан Д., Лінючев О., Сікорський О., Хлистун С., Миронюк О.**
Фотодеструкція біорозкладних полімерних покриттів на основі полілактиду і полікапролактону 9
2. **Данилкович А., Охмат О.**
Формування еластичної шкіри для взуття 22
3. **Іщенко О., Кучинська Д., Москаль Р.**
Аеробна біорозкладність плівкових полімерних матеріалів на основі крохмалю та полівінілового спирту як екологічно безпечної альтернативи для пакувальних матеріалів 30
4. **Колодій А., Плаван В., Ляшок І.**
Регулювання фізико-механічних властивостей акрил-уретанових полімерних матеріалів 38

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕЛЕКТРОНІКА, МЕХАНІЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

5. **Волівач А., Власов Р.**
Дослідження підходів до обробки та факторизації даних у геоінформаційних системах 47
6. **Завгородня Г., Завгородній В., Савченко А., Лемешко А.**
Методи забезпечення безпеки та обробки персоналізованих даних у системах адаптивної генерації контенту 58
7. **Пилипенко В.**
Вплив глибини стекінгового ансамблю на узагальнювальну здатність моделей прогнозування академічної успішності 72
8. **Скідан В., Мительська О., Афтандіянц В., Філімонов Д.**
Аналітичне дослідження інформаційних технологій моделювання бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу 80

TABLE OF CONTENTS

CHEMICAL AND BIOPHARMACEUTICAL TECHNOLOGIES

1. **Bilousova A., Baklan D., Linyuchev O., Sikorsky O., Khlystun S., Myronyuk O.**
Photodegradation of biodegradable polymer coatings based on polylactide and polycaprolactone 9
2. **Danylkovych A., Okhmat O.**
Production of elastic leather for footwear 22
3. **Ishchenko O., Kuchynska D., Moskal R.**
Aerobic biodegradability of film polymer materials based on starch and polyvinyl alcohol as an eco-friendly alternative to conventional packaging materials 30
4. **Kolodii A., Plavan V., Liashok I.**
Regulation of the physico-mechanical properties for the acrylic-urethane polymer materials 38

INFORMATION TECHNOLOGIES, ELECTRONICS, MECHANICAL AND ELECTRICAL ENGINEERING

5. **Volivach A., Vlasov R.**
A study of approaches to data processing and factorization in geoinformation systems 47
6. **Zavhorodnia H., Zavhorodnii V., Savchenko A., Lemeshko A.**
Methods for securing and processing personalized data in adaptive content generation systems 58
7. **Pylypenko V.**
Impact of stacking ensemble depth on generalization ability of academic performance prediction models 72
8. **Skidan V., Mytelska O., Aftandilyants V., Filimonov D.**
An analytical study of information technologies for modeling business processes in entrepreneurial-type educational institutions 80

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.1.1>

Received: 19.02.2026

Revised: 25.03.2026

Accepted: 09.04.2026

УДК 678

Anna BILOUSOVA, Denys BAKLAN,
Oleksandr LINYUCHEV, Oleksiy SIKORSKY,
Serhii KHYLYSTUN, Oleksiy MYRONYUK

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

PHOTODEGRADATION OF BIODEGRADABLE POLYMER COATINGS BASED ON POLYLACTIDE AND POLYCAPROLACTONE

Purpose. Comparison of the photodegradation resistance of polylactide and polycaprolactone coatings depending on the nature of the polymer and the film-forming method.

Methodology. Aqueous dispersions were obtained by emulsifying a polymer solution in dichloromethane, followed by removal of the organic solvent, washing, and concentration. Films from the dispersions were formed by applying them to a metal substrate, followed by heat treatment until a continuous coating was formed.

To assess changes caused by UV irradiation, the water contact angle and surface energy were determined, and the IR spectra of the films were analyzed. The features of film formation were analyzed, and the melt flow index of polylactide and polycaprolactone granules was determined to assess a possible relationship between the polymer's rheological characteristics and the particle coalescence temperature.

Findings. It was found that under the influence of UV irradiation, the surface of both polymers rapidly becomes hydrophilic. For films prepared from solutions, after 8 hours of irradiation, the contact angle decreased from $74 \pm 3^\circ$ to $24 \pm 3^\circ$ for polylactide and from $85 \pm 3^\circ$ to $40 \pm 3^\circ$ for polycaprolactone. For coatings formed from aqueous dispersions, the corresponding values changed from $79 \pm 3^\circ$ to $33 \pm 3^\circ$ and from $58 \pm 3^\circ$ to $43 \pm 3^\circ$. According to IR spectroscopy data, an increase in the area of the carbonyl peak shoulder in the $1700\text{--}1690\text{ cm}^{-1}$ region was observed, which is associated with the accumulation of carboxylic acids as photooxidation products. It was shown that coatings formed from aqueous dispersions exhibit slightly higher resistance to UV radiation compared to films obtained from solutions.

Originality. The relevance of the study stems from the need to combine the environmental benefits of biopolymers with sufficient operational stability of coatings under the influence of external factors, particularly ultraviolet radiation.

The practical value of this work lies in establishing the influence of the coating formation method on their resistance to UV aging, which can be utilized in the development of biodegradable polymeric materials with specified performance properties. The results obtained can be used to justify the choice of a method for forming biodegradable coatings with predictable resistance to photoaging.

Keywords: biopolymer coatings; photooxidation; aqueous dispersions; film formation; contact angle; surface energy; IR spectroscopy.

Introduction. Petrochemical-based plastics, which have become a staple of modern living, are characterized by their durability, resilience to degradation, and, in many instances, their single-use nature. These characteristics contribute significantly to the global volume of municipal solid waste. Projections indicate that by the year 2050, global oil consumption for plastic production will have increased by 20% (Narancic et al., 2020), and the amount of plastic entering the environment will reach 1.3 billion tons (Lau et al., 2020).

Moreover, a significant proportion of greenhouse gas emissions, approximately 50%, are directly attributable to the manufacturing process of conventional plastics (Huang et al., 2025). In contrast, the production of bioplastics has been shown to result in a reduction of emissions by 14% to 62% (Chen et al., 2023).

In this context, the transition to bioplastics is becoming increasingly important to reduce the carbon footprint and ensure biodegradability. Of particular interest within the field of biopolymers

are polylactic acid (PLA) and polycaprolactone (PCL). PLA is a highly promising biopolymer that has demonstrated significant commercial viability. It is distinguished by its low density, cost-effectiveness, and optimal balance of flexibility and rigidity (Wu et al., 2023). PCL is distinguished by its high biocompatibility, biodegradability, and good elasticity, which are attributable to its low glass transition temperature (Mokoena et al., 2025; Dwivedi et al., 2019).

The combination of these characteristics renders PLA and PCL promising materials for the formation of bio-coatings, including those using aqueous dispersion systems (Belletti et al., 2021; Calosi et al., 2024).

Concurrently, the implementation of bio-coatings is associated with a number of limitations. The eco-compatibility of such materials, particularly their biodegradability, does not always align with the requirements for long-term operational stability. For practical application, the material must maintain its integrity, adhesion, and functional properties throughout its specified service life, while its degradation must occur in a controlled manner (Glaskova-Kuzmina et al., 2021), preferably after the end of its use. In this regard, achieving an equilibrium between durability and biodegradability constitutes a pressing challenge in the contemporary context (Jahangiri et al., 2024).

Despite the growing popularity of biopolymer coatings, the issue of their service life remains under-researched. For PLA, the preparation of coatings from aqueous dispersions has been the subject of study Belletti et al. (2021), but their resistance to UV radiation has not been addressed. Most studies on PLA and PCL have been conducted independently of one another, notably in the works of Copinet et al. (2004) and Vukoje et al. (2022). However, no comparative analysis of the UV resistance of coatings made from these materials by applying solutions and aqueous dispersions was found in the available sources.

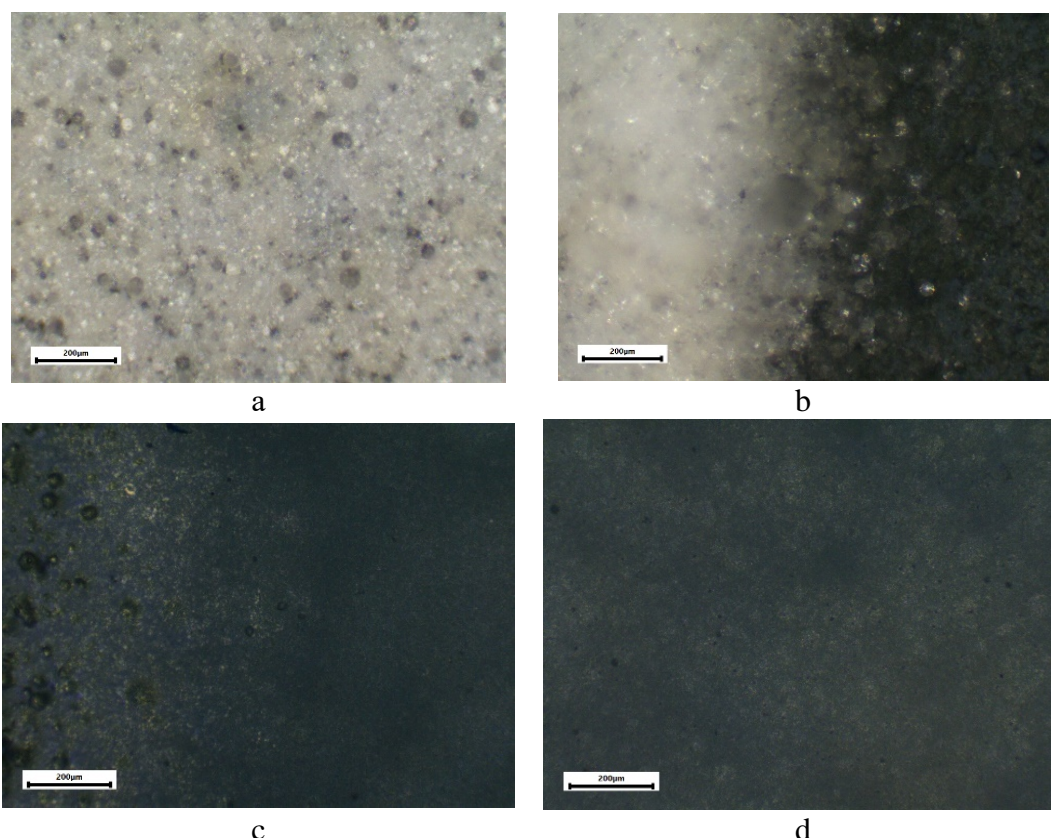
The objective of this study is to comparatively analyze the photodegradation resistance of coatings based on polylactide and polycaprolactone, obtained from solutions and aqueous dispersions. Also, a direct experimental comparison with melt-processed films was not included in the present study, since its main objective was to compare coatings formed from polymer solutions and aqueous dispersions.

Materials and Methods. In this study, PLA 4060D and PCL CAPA-6503 were used as polymers. The PLA 4060D grade was selected due to its amorphous structure (glass transition temperature of 55–60 °C), which improves its suitability for use in films. PCL CAPA-6503 was selected as a biodegradable thermoplastic polyester due to its excellent processability and ability to form flexible semi-crystalline materials. Its low glass transition temperature (–60 °C) ensures high flexibility and stability in film form. Dichloromethane was used as the solvent for PLA and PCL.

The procedure for preparing PLA and PCL dispersions was identical and consisted of the following steps. In the first step, sodium dodecyl sulfate (0.21 g) was dissolved in distilled water (53.6 g). Next, 50 g of a 5% PLA or PCL solution in dichloromethane was gradually added to the solution. The each PLA and PCL solution was mixed with the sodium dodecyl sulfate solution using a disperser at a speed of 27,000 rpm for 2 minutes. The next step was the gradual removal of dichloromethane, which was carried out on a rotary evaporator. The water bath temperature was 40 °C. To accelerate the removal of dichloromethane, a mild vacuum of up to -0.5 atm was created. After 4 hours of distillation, the resulting dispersions were cooled to room temperature and dried under vacuum in static conditions for an additional 2 hours. The next step was to wash the PLA and PCL dispersions to remove sodium dodecyl sulfate. To do this, water and dispersion particles were separated by centrifugation at 13,500 rpm for 20 minutes. The process was repeated 3 times, replacing the water remaining after centrifugation with distilled water. To concentrate the PLA dispersion for rapid water removal, a vacuum drying oven was used at 40 °C and full vacuum. Then, PCL and PLA particles from an aqueous dispersion were deposited onto a metal substrate using a coater with a gap width of 100 µm and dried at room temperature. In the next step, the metal substrate with the deposited sample was heat-treated until a continuous transparent film formed.

UV irradiation of the samples was conducted in accordance with ASTM International (ASTM D 4329) using a 250 W UVC fluorescent lamp. The samples were exposed for 8 hours at 60 ± 5 °C. Optical microscopy images were obtained on a Konus Academy optical microscope using a UCMOS 1300 digital camera (Sigeta Optics) and ToupView software. Chemical analysis was performed using FTIR spectroscopy in ATR mode (IRSpirit, Shimadzu). For water contact angle and evaluation surface tension values were used contact angle goniometer (BGD-190, Biuged Precision Instruments, Guangzhou, China) with parameters 5 μ L drop volume, 10 different positions on the sample surface. The melt flow index was determined for samples in accordance to the ISO 1133-22 procedure.

Results and Discussion. The main stages of the process of forming a polycaprolactone film from dispersions are shown in (Fig. 1). During drying at room temperature, a dry, uniform layer of polymer microparticles (Fig. 1a) with a thickness of 120–150 μ m was formed. This layer was heated on a heating plate at a rate of 10 °C/min. Fig. 1b shows the phase boundary of the material discrete particles a continuous film with air inclusions. The coalescence of particles is due to the fact that as the temperature rises to 60 °C, the interaction between particles intensifies due to surface forces, resulting in a significant number of particles deforming and beginning to coalesce, forming a film (Belletti et al., 2021). At this stage, small particles coalesce first, while larger particles and aggregates remain visible on the surface (Fig. 1c). At this stage, the film is not fully transparent. To complete the formation of a continuous coating, including the coalescence of larger particles and aggregates, the thermal treatment temperature was increased to 80 °C and maintained for 5 min (Fig. 1d).

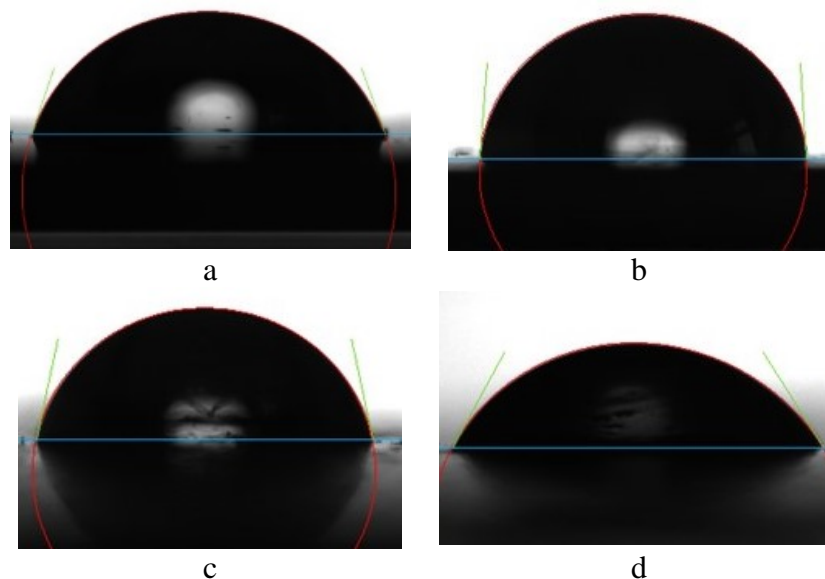


Source: developed by the authors of this study based on the findings of experimental research.

Fig. 1. Optical microscopy of film formation from PCL dispersion particles:

a) 25 °C; b) 50 °C; c) 60 °C; d) 80 °C

The experiment revealed that the initial contact angle for films produced from dispersed particles is abnormally low, at approximately 40–45°. After rinsing the film with clean warm water, the contact angle returns to the typical range for polycaprolactone and polylactide of 60–80° (Fig. 2).



Source: developed by the authors of this study based on the findings of experimental research.

Fig. 2. Initial contact angles of films:

a) PLA solution; b) PCL solution; c) PLA dispersion; d) PCL dispersion

This may be due to the presence of residual sodium dodecyl sulfate (SDS) remaining after the dispersion stage (Tzitzinou et al., 1999). During the thermal sintering of the particles, the surfactant likely migrates to the surface of the film, which leads to a decrease in the contact angle.

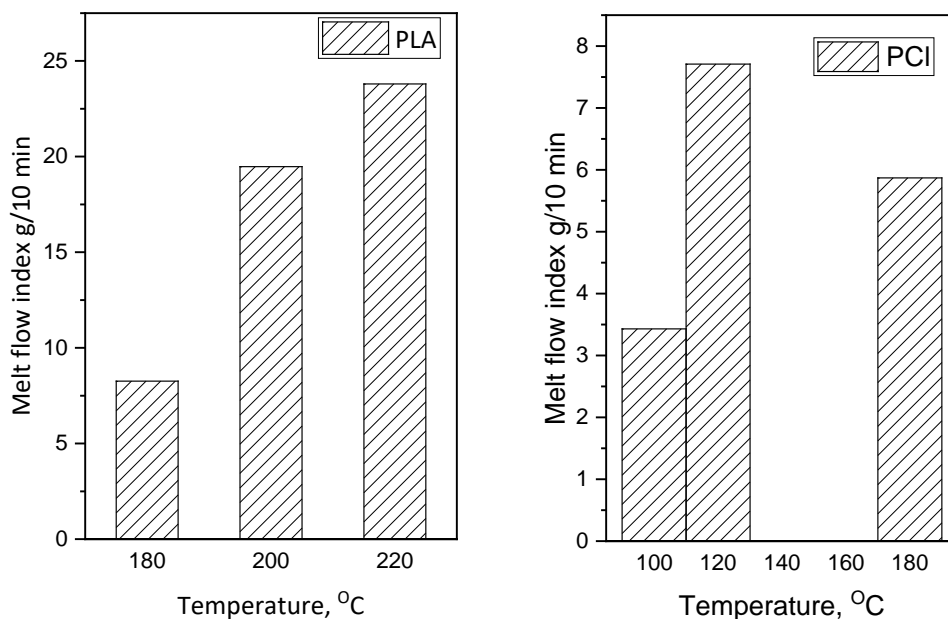
The effect of heat treatment itself on surface hydrophilization has not been confirmed, since the films obtained from the solution did not show a decrease in the contact angle even after 30 minutes of heat treatment under similar conditions.

In this regard, during sample preparation prior to measuring the contact angle, it was decided to rinse them with warm water and dry them in an oven at 40 °C.

The film-forming process of polylactic acid films differed from PCL only in the characteristic temperatures of the film-forming processes and was studied in detail by us in O. Myronyuk et al. (2025). In particular, for unplasticized PLA, the onset temperature of film formation is 110 °C, and the formation of a continuous film (final removal of entrapped air bubbles) is 160 °C. In principle, film formation from such dispersions is similar to the formation of films from aqueous polymer emulsions, but requires additional heating after water evaporation.

It is known that film formation from aqueous polymer dispersions occurs through the sequential evaporation of the dispersion medium and the coalescence of polymer particles under the action of capillary forces (Brock et al., 2010). The determining parameters of this process are both the value of the capillary pressure (determined by the size of the capillaries between the particles) and the softness of the polymer particles, their ability to deform (Semerdzhiev et al., 2024). Accordingly, a hypothesis was formulated regarding a probable correlation between the ratio of polymer viscosity and the minimum temperature of their film formation.

To test this hypothesis regarding a possible correlation between the melt flow index (MFI) and the particles' ability to coalesce (Voogt et al., 2019), MFI measurements were conducted for polylactide and polycaprolactone pellets (Fig. 3).



Source: developed by the authors of this study based on the findings of experimental research.

Fig. 3. Melt flow index of PLA and PCL pellets

It was expected that a higher MFI, as an indicator of greater melt fluidity, would correspond to a lower film-forming temperature. However, the results did not confirm this relationship. For PCL at 180 °C, the MFI value was lower than that for PLA, at 5.87 versus 8.26, while the film-forming temperature of polycaprolactone is lower than that of polylactide. For PCL, film formation begins as early as 60 °C (30 sec), but to ensure complete fusion of all aggregates, the temperature was increased to 80 °C (10 sec). For PLA, film formation begins at 110 °C (60 sec), and the film becomes fully transparent at 130 °C in 30 sec.

One possible explanation for this discrepancy is that particle coalescence occurs predominantly not in the temperature range corresponding to the viscoelastic state, but in that characteristic of the highly elastic plateau. As described in Man and Russel (2008), the particles deform, filling the free volume, accompanied by surface diffusion of the mobile segments of the polymer chains. In this case, the determining parameters are the elastic modulus of the particle material at a given temperature and their “stickiness”, which is due to segmental mobility.

Degradation of films under UV light. To compare the effects of UV irradiation on the surface of the films, the water contact angle was measured. The results of the study (Table 1) indicate that under the influence of UV radiation, the surface of both polymers rapidly becomes hydrophilic (Koo & Jang, 2008), with PLA being more sensitive to UV radiation than PCL.

Table 1

Change in the water contact angle of PLA and PCL films as a function of UV irradiation duration

Sample	Water contact angle, ° (0 hours)	Water contact angle, ° (4 hours)	Water contact angle, ° (8 hours)
PLA, solution-based film	74±3	58±3	24±3
PCL, solution-based film	85±3	76±3	40±3
PLA dispersion-based film	79±3	56±3	33±3
PCL, dispersion-based film	58±3	56±3	43±3

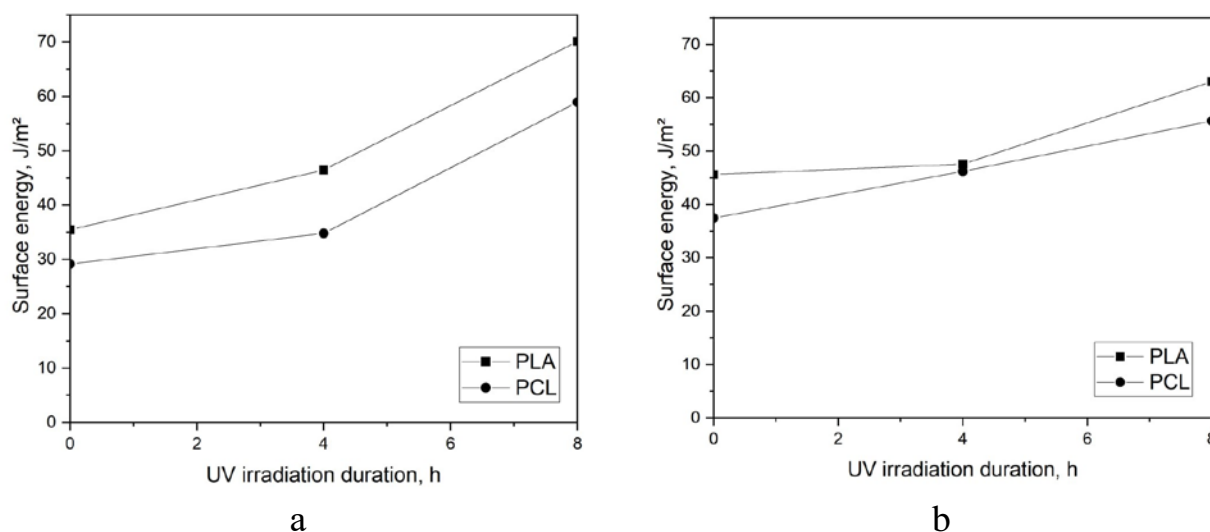
Source: developed by the authors of this study based on the findings of experimental research.

For films prepared from solution, the initial contact angle of PLA was $74\pm 3^\circ$, and that of PCL was $85\pm 3^\circ$. After 4 hours of UV irradiation, this value decreased to $58\pm 3^\circ$ for PLA and $76\pm 3^\circ$ for PCL, and after 8 hours – to $24\pm 3^\circ$ and $40\pm 3^\circ$, respectively. A similar pattern was observed for films formed from dispersed particles. The initial contact angle for PLA was $79\pm 3^\circ$, and for PCL, $58\pm 3^\circ$. After 4 hours of irradiation, both samples had a contact angle of $56\pm 3^\circ$, and after 8 hours, this value decreased to $33\pm 3^\circ$ for PLA and 43° for PCL.

Change in surface energy. The hydrophilization of PLA and PCL polymer films is primarily attributed to an oxidation process involving ultraviolet light quanta and oxygen molecules (or ozone), which, upon interaction with surface micromolecules, lead to the formation of a set of polar groups – ranging from unstable hydroperoxides in the initial stages of the process to relatively stable carboxyl groups that accumulate on the surface. Consequently, these groups increase the growth of the polar component of surface energy, the wettability by polar liquids, and, in particular, water (Koo & Jang, 2008).

Fig. 4a shows that under UV irradiation, the surface energy of both polymers increases at a rate of approximately 1.8–1.9 times after 8 hours of irradiation. PCL has a lower initial surface energy and, consequently, a lower surface energy after irradiation as well.

The same trend is observed when coatings are obtained from polymer dispersions, but for them the overall rate of energy increase is lower, as is the resulting value after 8 hours of irradiation. Also noteworthy is the difference between the surface energy values for soluble films and dispersions after 4 and 8 hours of irradiation.



Source: developed by the authors of this study based on the findings of experimental research.

Fig. 4. Change in surface energy as a function of UV irradiation duration:

a) films formed from solutions; b) films based on dispersed particles

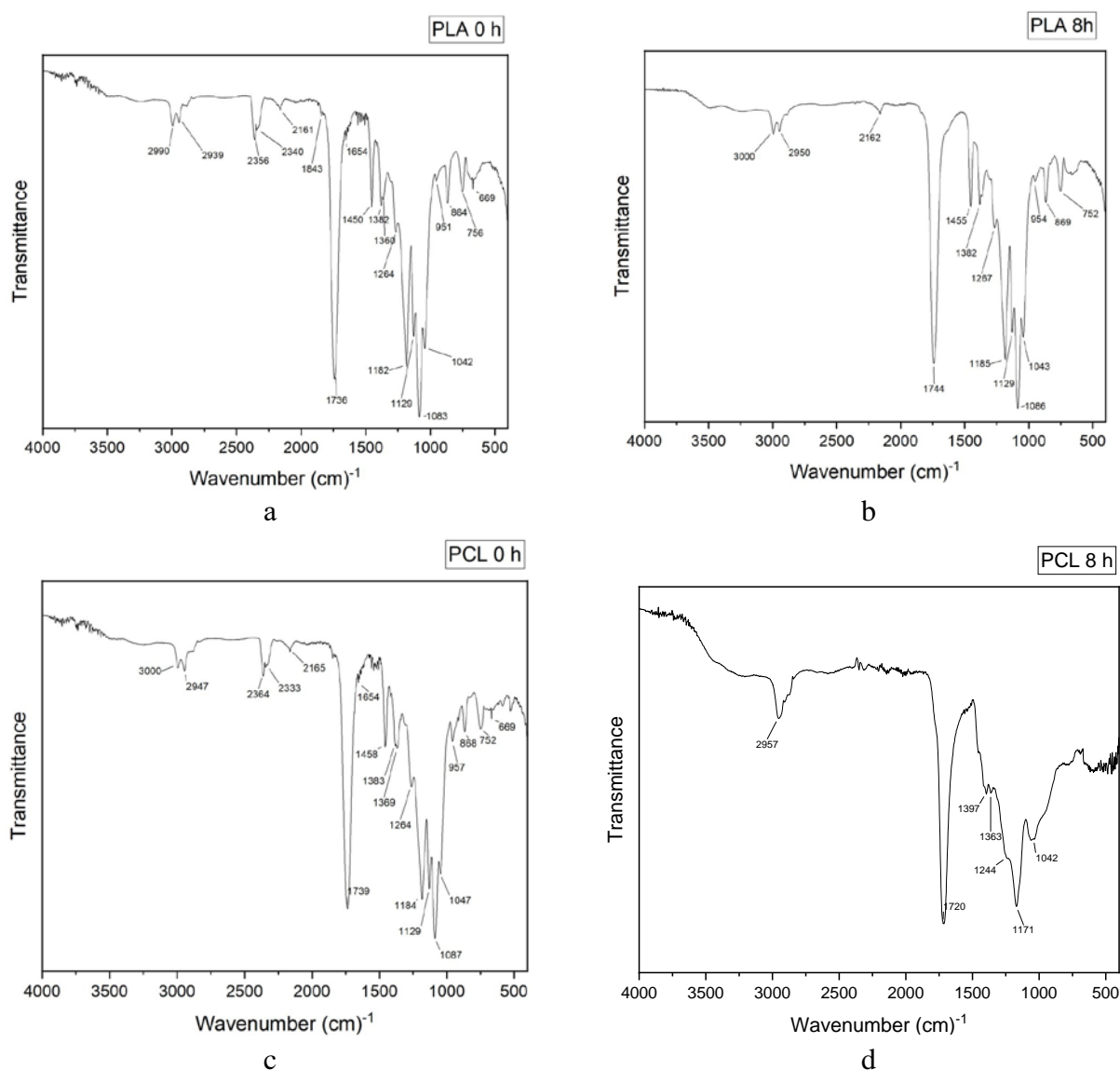
For films prepared from a solution, the rate increases significantly after 4 hours of irradiation, whereas for those prepared from dispersions, it remains nearly constant.

This difference can be explained by the fact that films formed from a solution in dichloromethane are characterized by a denser packing of macromolecules and a smaller number of structural defects and amorphous interparticle boundaries, which reduces scattering and shielding of UV radiation and promotes more efficient photodegradation. At the same time, films from aqueous dispersions have a heterogeneous morphology with interparticle boundaries and residual stabilizers, which can partially absorb or scatter UV radiation and slow down degradation (Tzitzinou et al., 1999).

IR spectroscopy. The primary mechanism of polylactide photooxidation involves the photolysis of the ester bond, followed by radical chain scission via the Norrish II mechanism and the formation of hydroperoxides, which subsequently decompose to form carboxyl and unsaturated groups (Olewnik-Kruszkowska et al., 2015). At the same time, given the significantly higher intensity of the absorption bands of the valence vibrations of carboxyl groups compared to the corresponding vibrations of unsaturated bonds, analysis of this specific part of the spectrum is the most accurate.

The primary mechanism of polycaprolactone photodegradation involves auto-oxidation leading to the formation of hydroperoxides and subsequent β -cleavage of the macromolecular chain. In the IR spectrum, this manifests as an increase in the intensity of the carbonyl (~ 1700 – 1730 cm^{-1}) and hydroxyl (3600 – 3200 cm^{-1}) groups, as well as a decrease in the intensity of the C–O–C ester bond bands (França et al., 2018).

To characterize the degradation processes based on the analysis of spectra of polymer films obtained from solutions (Fig. 5), the ratio of the area of the “shoulder” of the main carbonyl peak at 1700 – 1690 cm^{-1} in the fresh film to that in the film after 8 hours of degradation was used as an indicator.

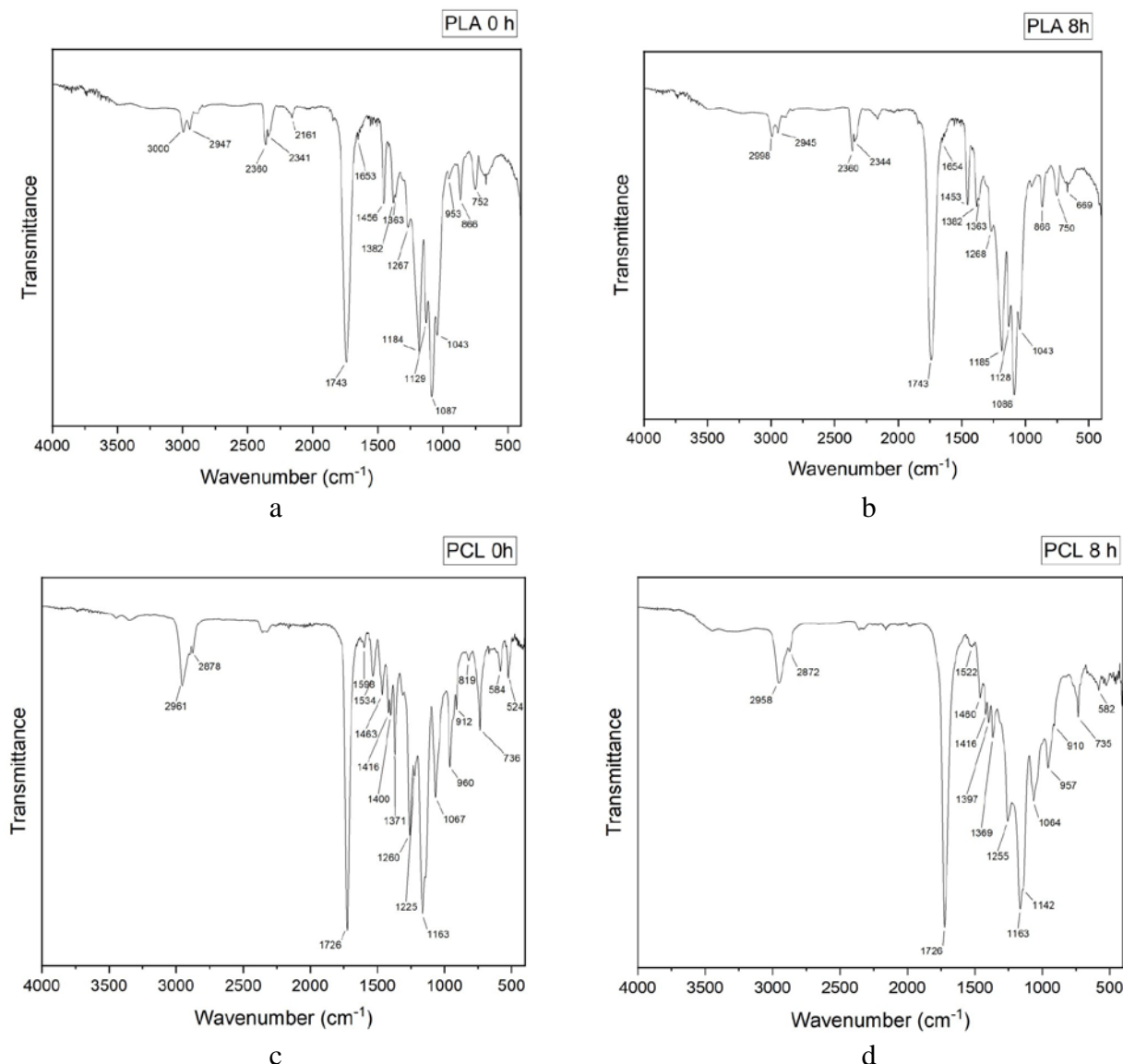


Source: developed by the authors of this study based on the findings of experimental research.

Fig. 5. Changes in the IR spectrum as a function of UV irradiation duration for solution-cast films

For polylactide, this value is 1.45, and for polycaprolactone, it is 1.5. This confirms previous findings regarding the similarity in the photodegradation rates of these materials.

At the same time, for the dispersions (Fig. 6), this coefficient is lower – 1.32 and 1.27, respectively – which indicates a slight slowing of the oxidation process in this case.



Source: developed by the authors of this study based on the findings of experimental research.

Fig. 6. Changes in the IR spectrum as a function of UV irradiation duration for films from dispersions

Overall, the results obtained are consistent with observations of changes in the surface energy of polymers during photooxidation. It can be concluded that the main reason for this increase is the accumulation of carboxylic acids, which are produced during the decomposition of hydroperoxides formed as a result of contact between polymer molecules and atmospheric oxygen (Olewnik-Kruszkowska et al., 2015b).

Future research in this area should focus on expanding comparisons of various methods for forming biodegradable polymer coatings, particularly those involving melt-formed films, and on evaluating the effects of coating thickness, crystallinity, and morphology on their resistance to UV aging. It is also advisable to study long-term aging under the combined action of UV radiation,

temperature, humidity, and oxygen, as well as to investigate changes in mechanical properties, adhesion to the substrate, molecular weight, and biodegradation behavior after irradiation. In future work, special attention should be paid to the influence of residual stabilizers, surfactants, plasticizers, and functional fillers on the photooxidation processes of PLA and PCL coatings, which will allow for the targeted regulation of the balance between operational stability and the materials' ability to undergo controlled degradation.

Conclusion. It has been shown that the photodegradation rates of polylactide and polycaprolactone are very similar: the area of the “shoulder” at 1700–1690 cm^{-1} , which is an indicator of the amount of carboxylic acids products of photodegradation increases by 1.45 for polylactide and by 1.5 for polycaprolactone after 8 hours of irradiation. This is accompanied by an increase in the surface energy of these materials from 35 to 70 J/m^2 and from 30 to 62 J/m^2 , respectively. It has been established that films made from dispersions are somewhat more resistant to the effects of ultraviolet radiation compared to films made from solutions. Thus, for them, the area of the specified “shoulder” increases only by a factor of 1.32 and 1.27, while the surface energy increases to 64 J/m^2 for polylactide and 56 J/m^2 for polycaprolactone. It has been proven that the ratio of the minimum film-forming temperatures of the studied polymers does not correlate with the ratio of their melt flow indices.

Acknowledgements. None.

Funding. This research was funded by Ministry of Education and Science of Ukraine, agreement number PH/53 – 2024 (26.09.2024) (European Union aid instrument for fulfilling Ukraine's obligations in the Framework Program of the European Union for Scientific Research and Innovation "Horizon 2020").

Conflict of Interest. None.

References

Література

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Belletti, G., Buoso, S., Ricci, L., Guillem-Ortiz, A., Aragón-Gutiérrez, A., Bortolini, O., & Bertoldo, M. (2021). Preparations of Poly(lactic acid) Dispersions in Water for Coating Applications. <i>Polymers</i>, 13(16), 2767. DOI: https://doi.org/10.3390/polym13162767. 2. Brock, T., Groteklaes, M., & Mischke, P. (2010). European Coatings Handbook (2nd ed.). Vincentz Network. URL: https://download.e-bookshelf.de/download/0000/8409/12/L-G-0000840912-0019948100.pdf. 3. Calosi, M., D'Iorio, A., Buratti, E., Cortesi, R., Franco, S., Angelini, R., & Bertoldo, M. (2024). Preparation of high-solid PLA waterborne dispersions with PEG-PLA-PEG block copolymer as surfactant and their use as hydrophobic coating on paper. <i>Progress in Organic Coatings</i>, 193, 108541. DOI: https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108541. 4. Chen, G., Li, J., Sun, Y., Wang, Z., Leeke, G. A., Moretti, C., Cheng, Z., Wang, Y., Li, N., Mu, L., Li, J., Tao, J., Yan, B., & Hou, L. (2023). Replacing Traditional Plastics with Biodegradable Plastics: Impact on Carbon Emissions. <i>Engineering</i>, 32, 152–162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.002. 5. Copinet, A., Bertrand, C., Govindin, S., Coma, V., & Couturier, Y. (2004). Effects of ultraviolet light | <ol style="list-style-type: none"> 1. Belletti G., Buoso S., Ricci L., Guillem-Ortiz A., Aragón-Gutiérrez A., Bortolini O., Bertoldo M. Preparations of Poly(lactic acid) Dispersions in Water for Coating Applications. <i>Polymers</i>. 2021. No. 13(16). Art. 2767. DOI: https://doi.org/10.3390/polym13162767. 2. Brock T., Groteklaes M., Mischke P. European Coatings Handbook. 2nd ed. Vincentz Network, 2010. URL: https://download.e-bookshelf.de/download/0000/8409/12/L-G-0000840912-0019948100.pdf. 3. Calosi M., D'Iorio A., Buratti E., Cortesi R., Franco S., Angelini R., Bertoldo M. Preparation of high-solid PLA waterborne dispersions with PEG-PLA-PEG block copolymer as surfactant and their use as hydrophobic coating on paper. <i>Progress in Organic Coatings</i>. 2024. No. 193. Art. 108541. DOI: https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108541. 4. Chen G., Li J., Sun Y., Wang Z., Leeke G. A., Moretti C., Cheng Z., Wang Y., Li N., Mu L., Li J., Tao J., Yan B., Hou L. Replacing Traditional Plastics with Biodegradable Plastics: Impact on Carbon Emissions. <i>Engineering</i>. 2023. No. 32. P. 152–162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.002. 5. Copinet A., Bertrand C., Govindin S., Coma V., Couturier Y. Effects of ultraviolet light (315 nm), |
|---|--|

- (315 nm), temperature and relative humidity on the degradation of polylactic acid plastic films. *Chemosphere*, 55(5), 763–773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.11.038>.
6. Dwivedi, R., Kumar, S., Pandey, R., Mahajan, A., Nandana, D., Katti, D. S., & Mehrotra, D. (2019). Polycaprolactone as biomaterial for bone scaffolds: Review of literature. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 10(1), 381–388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2019.10.003>.
7. França, D. C., Morais, D. D., Bezerra, E. B., Araújo, E. M., & Wellen, R. M. R. (2018). Photodegradation Mechanisms on Poly(ϵ -caprolactone) (PCL). *Materials Research*, 21(5). DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0837>.
8. Glaskova-Kuzmina, T., Starkova, O., Gaidukovs, S., Platnieks, O., & Gaidukova, G. (2021). Durability of biodegradable polymer nanocomposites. *Polymers*, 13(19), 3375. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13193375>.
9. Huang, S., Dong, Q., Che, S., Li, R., & Tang, K. H. D. (2025). Bioplastics and biodegradable plastics: A review of recent advances, feasibility and cleaner production. *The Science of the Total Environment*, 969, 178911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178911>.
10. Jahangiri, F., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2024). Sustainable biodegradable coatings for food packaging: challenges and opportunities. *Green Chemistry*, 26(9), 4934–4974. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3gc02647g>.
11. Koo, G., & Jang, J. (2008). Surface modification of poly(lactic acid) by UV/Ozone irradiation. *Fibers and Polymers*, 9(6), 674–678. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-008-0106-1>.
12. Lau, W. W. Y., Shiran, Y., Bailey, R. M., Cook, E., Stuchtey, M. R., Koskella, J., Velis, C. A., Godfrey, L., Boucher, J., Murphy, M. B., Thompson, R. C., Jankowska, E., Castillo, A. C., Pilditch, T. D., Dixon, B., Koerselman, L., Kosior, E., Favoino, E., Gutberlet, J., . . . Palardy, J. E. (2020). Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, 369(6510), 1455–1461. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>.
13. Man, W., & Russel, W. B. (2008). Direct measurements of critical stresses and cracking in thin films of colloid dispersions. *Physical Review Letters*, 100(19), 198302. DOI: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.198302>.
14. Mokoena, T. E., Mokoena, L. S., & Mofokeng, J. P. (2025). The impact of Micro-Nanoparticles on morphology, thermal, barrier, mechanical, and thermomechanical properties of PLA/PCL blends for application in temperature and relative humidity on the degradation of polylactic acid plastic films. *Chemosphere*. 2004. No. 55(5). P. 763–773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.11.038>.
6. Dwivedi R., Kumar S., Pandey R., Mahajan A., Nandana D., Katti D. S., Mehrotra D. Polycaprolactone as biomaterial for bone scaffolds: Review of literature. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2019. No. 10(1). P. 381–388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2019.10.003>.
7. França D. C., Morais D. D., Bezerra E. B., Araújo E. M., Wellen R. M. R. Photodegradation Mechanisms on Poly(ϵ -caprolactone) (PCL). *Materials Research*. 2018. No. 21(5). DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0837>.
8. Glaskova-Kuzmina T., Starkova O., Gaidukovs S., Platnieks O., Gaidukova G. Durability of biodegradable polymer nanocomposites. *Polymers*. 2021. No. 13(19). Art. 3375. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13193375>.
9. Huang S., Dong Q., Che S., Li R., Tang K. H. D. Bioplastics and biodegradable plastics: A review of recent advances, feasibility and cleaner production. *The Science of the Total Environment*. 2025. No. 969. Art. 178911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178911>.
10. Jahangiri F., Mohanty A. K., Misra M. Sustainable biodegradable coatings for food packaging: challenges and opportunities. *Green Chemistry*. 2024. No. 26(9). P. 4934–4974. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3gc02647g>.
11. Koo G., Jang J. Surface modification of poly(lactic acid) by UV/Ozone irradiation. *Fibers and Polymers*. 2008. No. 9(6). P. 674–678. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-008-0106-1>.
12. Lau W. W. Y., Shiran Y., Bailey R. M., Cook E., Stuchtey M. R., Koskella J., Velis C. A., Godfrey L., Boucher J., Murphy M. B., Thompson R. C., Jankowska E., Castillo A. C., Pilditch T. D., Dixon B., Koerselman L., Kosior E., Favoino E., Gutberlet J., . . . Palardy J. E. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*. 2020. No. 369(6510). P. 1455–1461. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>.
13. Man W., Russel W. B. Direct measurements of critical stresses and cracking in thin films of colloid dispersions. *Physical Review Letters*. 2008. No. 100(19). Art. 198302. DOI: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.198302>.
14. Mokoena T. E., Mokoena L. S., Mofokeng J. P. The impact of Micro-Nanoparticles on morphology, thermal, barrier, mechanical, and thermomechanical properties of PLA/PCL blends for application in

- application in personal hygiene: a review. *Polymers*, 17(17), 2396. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17172396>.
15. Myronyuk, O., Baklan, D., Bilousova, A., Smalii, I., Vorobyova, V., Halysh, V., & Trus, I. (2025). Plasticized Polylactide Film Coating Formation from Redispersible Particles. *AppliedChem*, 5(3), 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/appliedchem5030014>.
16. Narancic, T., Cerrone, F., Beagan, N., & O'Connor, K. E. (2020). Recent advances in bioplastics: application and biodegradation. *Polymers*, 12(4), 920. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12040920>.
17. Olewnik-Kruszkowska, E., Koter, I., Skopińska-Wiśniewska, J., & Richert, J. (2015). Degradation of polylactide composites under UV irradiation at 254 nm. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 311, 144–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2015.06.029>.
18. Semerdzhiev, S. A., Van Der Kooij, H. M., Fokkink, R., Van Der Gucht, J., & Sprakel, J. (2024). Quantifying the Open Time and Film Formation of Waterborne Coatings with Laser Speckle Imaging. *ACS Applied Optical Materials*, 2(5), 750–760. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaom.4c00051>.
19. Tzitzinou, A., Jenneson, P., Clough, A., Keddie, J., Lu, J., Zhdan, P., Treacher, K., & Satguru, R. (1999). Surfactant concentration and morphology at the surfaces of acrylic latex films. *Progress in Organic Coatings*, 35(1–4), 89–99. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(99\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(99)00017-X).
20. Voogt, B., Huinink, H. P., Erich, S. J. F., Scheerder, J., Venema, P., Keddie, J. L., & Adan, O. C. G. (2019). Film Formation of High Tg Latex Using Hydroplasticization: Explanations from NMR Relaxometry. *Langmuir*, 35(38), 12418–12427. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01353>.
21. Vukoje, M., Kulčar, R., Ivanda, K. I., Bota, J., & Cigula, T. (2022). Improvement in thermochromic offset print UV stability by applying PCL nanocomposite coatings. *Polymers*, 14(7), 1484. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14071484>.
22. Wu, Y., Gao, X., Wu, J., Zhou, T., Nguyen, T. T., & Wang, Y. (2023). Biodegradable polylactic Acid and its composites: characteristics, processing, and sustainable applications in sports. *Polymers*, 15(14), 3096. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15143096>.
- personal hygiene: a review. *Polymers*. 2025. No. 17(17). Art. 2396. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17172396>.
15. Myronyuk O., Baklan D., Bilousova A., Smalii I., Vorobyova V., Halysh V., Trus I. Plasticized Polylactide Film Coating Formation from Redispersible Particles. *AppliedChem*. 2025. No. 5(3). Art. 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/appliedchem5030014>.
16. Narancic T., Cerrone F., Beagan N., O'Connor K. E. Recent advances in bioplastics: application and biodegradation. *Polymers*. 2020. No. 12(4). Art. 920. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12040920>.
17. Olewnik-Kruszkowska E., Koter I., Skopińska-Wiśniewska J., Richert J. Degradation of polylactide composites under UV irradiation at 254 nm. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2015. No. 311. P. 144–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2015.06.029>.
18. Semerdzhiev S. A., Van Der Kooij H. M., Fokkink R., Van Der Gucht J., Sprakel J. Quantifying the Open Time and Film Formation of Waterborne Coatings with Laser Speckle Imaging. *ACS Applied Optical Materials*. 2024. No. 2(5). P. 750–760. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaom.4c00051>.
19. Tzitzinou A., Jenneson P., Clough A., Keddie J., Lu J., Zhdan P., Treacher K., Satguru R. Surfactant concentration and morphology at the surfaces of acrylic latex films. *Progress in Organic Coatings*. 1999. No. 35(1–4). P. 89–99. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(99\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(99)00017-X).
20. Voogt B., Huinink H. P., Erich S. J. F., Scheerder J., Venema P., Keddie J. L., Adan O. C. G. Film Formation of High Tg Latex Using Hydroplasticization: Explanations from NMR Relaxometry. *Langmuir*. 2019. No. 35(38). P. 12418–12427. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01353>.
21. Vukoje M., Kulčar R., Ivanda K. I., Bota J., Cigula T. Improvement in thermochromic offset print UV stability by applying PCL nanocomposite coatings. *Polymers*. 2022. No. 14(7). Art. 1484. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14071484>.
22. Wu Y., Gao X., Wu J., Zhou T., Nguyen T. T., Wang Y. Biodegradable polylactic Acid and its composites: characteristics, processing, and sustainable applications in sports. *Polymers*. 2023. No. 15(14). Art. 3096. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15143096>.

BILOUSOVA ANNA

PhD Student,
Department of Chemical Technology
of Composite Materials,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2818-8450>
Scopus Author ID: 58668975800
E-mail: a.bilousova@kpi.ua

LINYUCHEV OLEKSANDR

PhD, Associate Professor,
Department of Ecology and Plant Polymers Technology,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1683-5937>
Scopus Author ID: 57205182822
E-mail: o.liniuchev@xf.kpi.ua

KHLYSTUN SERHIJ

PhD Student,
Department of Chemical Technology
of Composite Materials,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-8765-2360>
E-mail: khlystun.s.o.-khk41f@edu.kpi.ua

BAKLAN DENYS

PhD, Assistant,
Department of Chemical Technology
of Composite Materials,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6608-0117>
Scopus Author ID: 57194569043
E-mail: d.baklan@kpi.ua

SIKORSKY OLEKSIY

PhD, Senior Lecturer,
Department of Chemical Technology
of Composite Materials,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3730-2016>
E-mail: o.sikorsky@kpi.ua

MYRONYUK OLEKSIY

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of Department, Department of Chemical
Technology of Composite Materials,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0499-9491>
Scopus Author ID: 57190497257
E-mail: o.myronyuk@kpi.ua

**Анна БІЛОУСОВА, Денис БАКЛАН, Олександр ЛІНЮЧЕВ,
Олексій СІКОРСЬКИЙ, Сергій ХЛИСТУН, Олексій МИРОНЮК**

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

ФОТОДЕСТРУКЦІЯ БІОРОЗКЛАДНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІЛАКТИДУ І ПОЛІКАПРОЛАКТОНУ

Мета. Порівняння стійкості до фотодеструкції покриттів на основі полілактиду та полікапролактону залежно від природи полімеру та способу формування плівки.

Методика. Водні дисперсії одержували методом емульгування розчину полімеру в дихлорметані, з подальшим видаленням органічного розчинника, промиванням і концентруванням. Плівки з дисперсій формували нанесенням на металеву підкладку з наступною термічною обробкою до утворення суцільного покриття.

Для оцінки змін, спричинених УФ-опроміненням, було визначено кут змочування водою, поверхневу енергію, а також проаналізовано ІЧ-спектри плівок. Проаналізовано особливості плівкоутворення та визначено показник текучості розплаву гранул полілактиду і полікапролактону для оцінки можливого зв'язку між реологічними характеристиками полімеру та температурою коалесценції частинок.

Результати. Встановлено, що під дією УФ-опромінення поверхня обох полімерів швидко гідрофілізується. Для плівок, отриманих із розчинів, після 8 годин опромінення кут змочування зменшувався з $74 \pm 3^\circ$ до $24 \pm 3^\circ$ для полілактиду та з $85 \pm 3^\circ$ до $40 \pm 3^\circ$ для полікапролактону. Для покриттів, сформованих із водних дисперсій, відповідні значення змінювалися з $79 \pm 3^\circ$ до $33 \pm 3^\circ$ та з $58 \pm 3^\circ$ до $43 \pm 3^\circ$. За даними ІЧ-спектроскопії встановлено зростання площі плеча карбонільного піку в області $1700\text{--}1690\text{ см}^{-1}$, що пов'язано з накопиченням карбонових кислот як продуктів фотоокиснення. Показано, що покриття, сформовані з водних дисперсій, виявляють дещо вищу стійкість до дії УФ-випромінювання порівняно з плівками, отриманими з розчинів.

Наукова новизна. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю поєднання екологічних переваг біополімерів із достатньою експлуатаційною стабільністю покриттів під дією зовнішніх чинників, зокрема ультрафіолетового випромінювання.

Практична значимість роботи полягає у встановленні впливу способу формування покриттів на їх стійкість до УФ-старіння, що може бути використано під час розроблення біорозкладних полімерних матеріалів із заданими експлуатаційними властивостями. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування вибору способу формування біорозкладних покриттів із прогнозованою стійкістю до фотостаріння.

Ключові слова: біополімерні покриття; фотоокиснення; водні дисперсії; плівкоутворення; кут змочування; поверхнева енергія; ІЧ-спектроскопія.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.1.2>

Received: 10.02.2026

Revised: 05.03.2026

Accepted: 09.04.2026

УДК 675.92.027:675.2

Анатолій ДАНИЛКОВИЧ, Олена ОХМАТ

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ФОРМУВАННЯ ЕЛАСТИЧНОЇ ШКІРИ ДЛЯ ВЗУТТЯ

Мета. Підвищення еластичності шкіри для верху взуття шляхом використання в процесах додублювання-наповнювання ензимів гідролітичної дії.

Методика. У дослідженні застосовано метод асиметричної бахромки для комплектування дослідних партій зразків та їх подальшу ферментативну обробку ензимами за контрольованих температурних умов. Ефективність створення еластичної структури оцінювали шляхом аналізу пружно-пластичних властивостей шкіряних матеріалів, їх хімічних та фізико-механічних показників.

Результати. Досліджено вплив витрат ензимів на пружно-пластичні властивості шкіряних матеріалів та визначені їх фізико-хімічні властивості. Встановлено, що найбільш ефективний вплив на підвищення еластичності напівфабрикату виявляє суміш ензимів гідролітичної дії за оптимальної витрати 0,2% від маси напівфабрикату. Застосування дослідної технології дозволяє отримати еластичний шкіряний матеріал із меншою жорсткістю на 33–47% та вищим об'ємним виходом на 5,3% порівняно з типовою технологією. Також спостерігається збільшення виходу площі готової шкіри на 5,1–6,7% при одночасному зменшенні витрат хімічних реагентів на 27,0%.

Наукова новизна. Встановлено характер залежності пружно-пластичних та фізико-механічних властивостей шкіряного матеріалу від виду та концентрації ензимних реагентів, використаних для їх обробки. Доведено синергетичний ефект використання суміші ензимів на стадії рідинного оздоблення для пластифікації структури дерми.

Практична значимість. Розроблено ресурсоощадну технологію виробництва еластичних шкіряних матеріалів для верху взуття. Отримані результати можуть бути використані для розроблення нових технологій виробництва шкір широкого асортименту.

Ключові слова: напівфабрикат хромового дублення; ензимне оброблення; додублювання; наповнювання; синтан-танідна композиція; властивості.

Вступ. Еластичні шкіри завдяки комплексу їх спеціальних фізико-хімічних, гігієнічних та інших властивостей користуються широким попитом в різних галузях народного господарства враховуючи їх високу екологічну безпечність. При цьому споживні властивості натуральних шкір обумовлюють високий попит населення. Це стосується їх використання у швейній, меблевій та інших областях виробничої діяльності. При чому у взуттєвій промисловості шкіри підвищеної еластичності користуються особливо високим попитом населення, що обумовлює їх використання при виготовленні взуття самого широкого асортименту. У цьому відношенні такі шкіри можуть бути отримані внаслідок пошуку ефективних хімічних реагентів і розроблення технологій раціонального їх використання у шкіряному виробництві. Зокрема, це стосується біологічно активних і жирувальних реагентів та додублювально-наповнювальних композицій.

Для підвищення рухливості волокнистої структури шкіри при збереженні високих фізико-механічних властивостей дослідниками рекомендується використовувати у технології її виготовлення реагенти натуральної і синтетичної природи. Наприклад, на стадії лужного оброблення консервованих шкур сульфідом натрію і гідроксидом кальцію авторами [1] встановлено ефективне видалення неструктурованих інгредієнтів дерми, зокрема полісахаридів і протеогліканів, завдяки ензимній регідратації сировини [2]. Дослідники [3] зауважують, що використання ферментної обробки окрім технологічної ефективності сприяє і покращенню екологічного аспекту обробки натуральної шкіри. На стадії знезолування шкіряного напівфабрикату автори [4] рекомендують використовувати біологічно активні реагенти Lithudac LI Novo Bate WB, а при знежирюванні для видалення жирних речовин –

лужні ліпази та їх суміші з лужними протеазами. Автори [5] для пластифікації шкір використали модифіковане пальмове масло та кремнієву сполуку, молекули якої містять кінцеві гідроксильні групи з наступною їх етерифікацією малеїновим альдегідом і бісульфітом натрію. Використання колагенових поліпептидів, отриманих з відходів шкіряного виробництва, у дубильних процесах також сприяє отриманню м'якої, еластичної шкіри з високою паропроникністю [6]. Відомо [7] використання композиції аніонного типу Cogipol ALF на основі лецитину у виробництві широкого асортименту еластичних шкір. Цей модифікатор волокнистої структури має низьку в'язкість ті забезпечує стійкість отриманих шкір до світла і температури. У роботі [8] встановлено підвищення пружно-пластичних властивостей шкіри в результаті впливу кополімерів на основі акрилової кислоти в процесах додублювання. Авторами [9] досліджено вплив на структуру і властивості шкіри для верху взуття поліакрилового і меламіноформальдегідного синтанів RS3 та LF187. Встановлено ефективніший вплив на фізико-механічні показники шкіри синтану RS3 уже при його витраті 2,0% маси напівфабрикату, а при витраті 4 % збільшується вихід товщини шкіри на 5,5%. Еластичні шкіри, отримані з використанням наноконструкцій на основі монтморилоніту і поліакрилової кислоти [10, 11], характеризуються підвищеною орієнтацією волокнистої структури. Застосування наноконструктив у виробництві натуральної шкіри не тільки призводить до покращення їх еластичності та фізико-механічних властивостей, але і забезпечує перехід до так званих «зелених» технологій [12, 13]. Використання природних високодисперсних силікатів, модифікованих акриловими полімерами [14], забезпечує збереження ефекту розділення волокнистої структури шкіри після зневоднення і підвищує її пружно-пластичні властивості. Отже, аналіз науково-технічної літератури підтверджує, що сучасні стратегії регулювання пружно-пластичних властивостей шкіри базуються на комплексному використанні біологічно-активних сполук та хімічних реагентів. Беззаперечним є те, що ензимні препарати є найбільш ефективними у підготовчих та переддубильних процесах. Проте потенціал їх застосування на заключних стадіях рідинного оздоблювання залишається недостатньо вивченим, що обумовлює необхідність дослідження впливу ферментів на структурні зміни дерми для формування необхідних фізико-механічних характеристик еластичних шкіряних матеріалів.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення еластичності шкіри для верху взуття шляхом використання в процесах додублювання-наповнювання ензимів гідролітичної дії. Для цього реалізовані наступні задачі: дослідження впливу витрат ензимів на пружно-пластичні властивості структурованого шкіряного напівфабрикату; формування еластичної шкіри для взуття; визначення фізико-хімічних властивостей ензимно-обробленого напівфабрикату; визначення фізико-хімічних властивостей отриманого шкіряного матеріалу.

Матеріали та методи дослідження. У роботі використано шкіряний напівфабрикат великої рогатої худоби хромового дублення, отриманий зі шкур мокросолоного консервування – бичка масою 18 кг і ялівки легкої масою 13 кг, товщиною 1,4 мм та 0,9–1,1 мм відповідно. Як біологічно активні реагенти використані ензими гідролітичної дії, виділені з культур *Bacillus subtilis* і *Aspergillus awamori* [15], відповідно ензим-1 і ензим-2. Ензим-3 є сумішшю ензимів 1 і 2 взятих у рівних долях. Для дослідження впливу ензимів на пружно-пластичні властивості структурованого напівфабрикату основними сполуками хрому (III), використані зразки розміром 10×18 см з центральної ділянки напівфабрикату шкур бичка. Зразки оброблялись партіями, підібраними по 16 штук за методом асиметричної бахромки [16], у лабораторному барабані об'ємом 10 дм³ при його обертанні зі швидкістю 18–20 хв⁻¹. Спочатку зразки нейтралізували до рН 5,4 розчином формиату і бікарбонату натрію при співвідношенні 1/1 з наступним промиванням. При цьому температуру води підвищували до 75 °С відповідно до умов ензимного оброблення за співвідношення вода/напівфабрикат 1,5/1,0 упродовж 10–15 хв за тривалості оброблення 17–20 хв. Слід зауважити, що вибрана температура оброблення

напівфабрикату обумовлена температурою його гідротермічної стійкості з врахуванням температурної залежності процесів структурування. Контрольними були нейтралізовані і оброблені жирувальним реагентом зразки напівфабрикату.

Результати дослідження та їх обговорення. Результати дослідження впливу витрат ензимів на пружно-пластичні властивості структурованого напівфабрикату наведені на рис. 1, на якому жорсткість і межу міцності шкіряного напівфабрикату відображають криві 1–3 і 4–6; ензимам 1, 2 і 3 належать відповідно криві 1, 4; 2, 5 та 3, 6. Як видно з отриманих даних при збільшенні витрат ензиму-1 жорсткість напівфабрикату знижується, а його межа міцності при цьому досягає екстремального значення за витрати 0,2% маси напівфабрикату. Разом з тим ці показники напівфабрикату змінюються аналогічним чином більш інтенсивно при використанні ензиму-2. Максимальне зниження жорсткості та підвищення межі міцності відповідно у 2,2 рази і на 11,2% спостерігається при застосуванні ензиму-3 з витратою 0,2%. Отже, найбільш ефективний вплив на підвищення еластичності напівфабрикату виявляє ензим-3 за оптимальної його витрати.

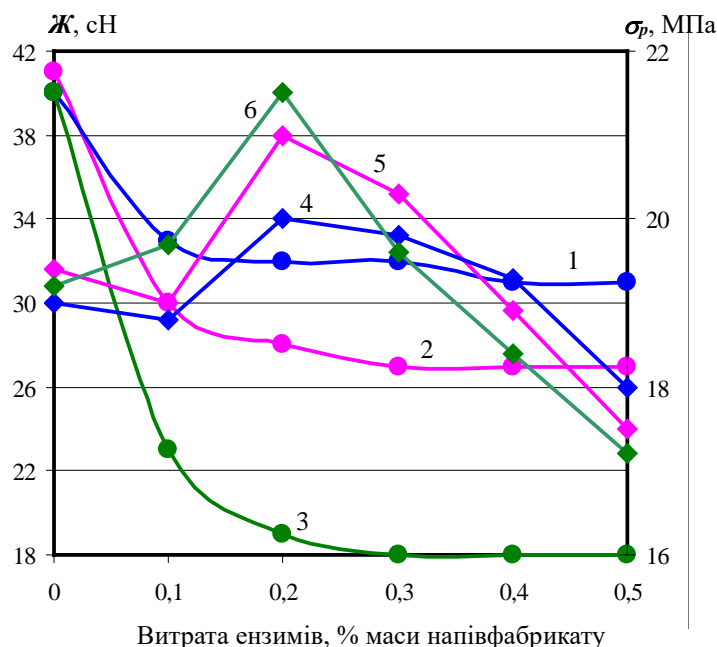


Рис. 1. Залежність фізико-механічних властивостей шкіряного напівфабрикату від витрат ензимів

Для порівняльного аналізу впливу ензимів і жирувального реагенту Tgron DL (фірма Трумплер, Німеччина), що використовується у технології промислового виробництва шкір, проведено дослідження фізико-механічних властивостей зразків отриманого напівфабрикату (рис. 2).

З наведеного рисунка видно, що при оптимальній витраті ензимів адекватно змінюються межа міцності σ_p та видовження при розриві ε_p зразків шкіряного напівфабрикату для трьох ензимів. При цьому як для σ_p , так і для ε_p оброблені ензимами зразки напівфабрикату мають вищі показники порівняно із зразками, обробленими тільки жирувальним реагентом. Разом з тим ензим-3 дозволяє отримати зразки з підвищеною міцністю на 17,6% і видовженням при розриві на 23,8% порівняно з контрольним варіантом, що свідчить про суттєво вищу його пластифікаційну дію на структуру шкіряного напівфабрикату.

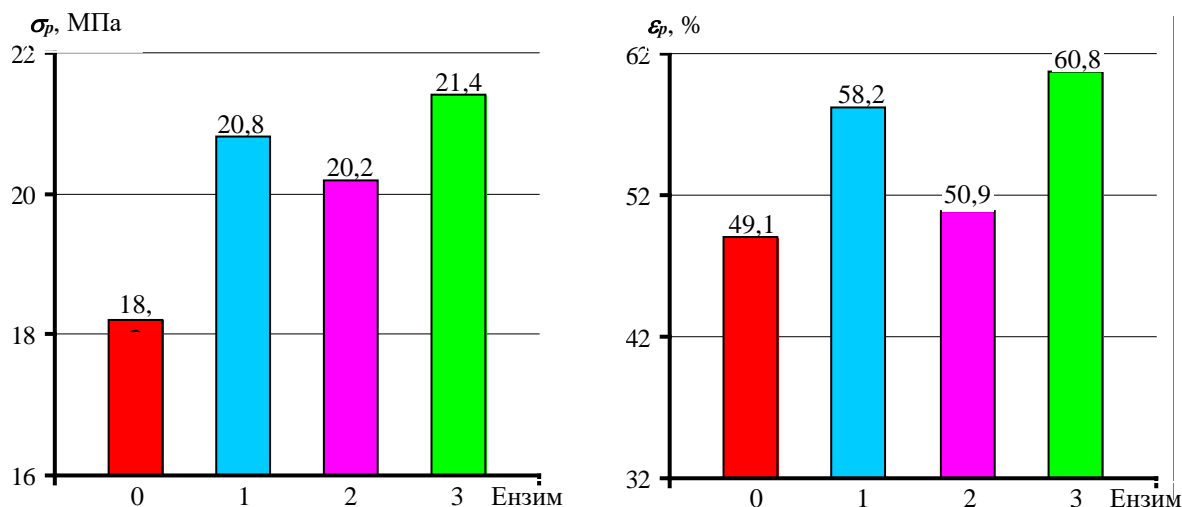


Рис. 2. Залежність межі міцності шкіряного напівфабрикату та його розривного видовження від виду ензиму

Для формування шкіряного напівфабрикату у рідинному оздоблюванні використано половинки структурованого напівфабрикату з ялівки легкої. Процес його рідинного оздоблювання проводили у підвісному барабані фірми об'ємом 0,39 м³. Технологічне оброблення нейтралізованого напівфабрикату виконували при зменшеній витраті води на 33% і температурі технологічного розчину 71–75 °С. В подальшому процес оброблення напівфабрикату проводили за температури 50–53 °С з використанням відповідного складу наповнювально-жирувальної композиції залежно від варіанту оброблення (табл. 1).

Таблиця 1

Склад наповнювально-жирувальної композиції для рідинного оздоблювання шкіряного напівфабрикату

Реагент	Значення показника, %, за технологією		
	дослідною 1	дослідною 2	діючою
Ензим-3	0,2	0,2	0
Кремнезем А-300	0	1	0
Trupon DL	7	6	7
Relugan D	0	0	2
Trupotan G	2	2	3
Квебрахо	5	5	6

З таблиці 1 видно, що склад композицій дослідних технологій відрізняється від діючої відсутністю реагенту Relugan D і суттєво зменшеною витратою наповнювальних реагентів. Разом з тим розроблені технології різняться використанням ензиму-3 при мінімальному вмісті 1% та аеросилу А-300 (ТУ U 24.1-31695418-002:2008) з розміром первинних частинок 4–50 нм у дослідній технології 2 [17].

В процесі наповнювання напівфабрикат обробляли жирувальним реагентом Trupon DL (фірма Трумплер, Німеччина) упродовж 30–40 хв, допоміжним синтаном Trupotan G (фірма Трумплер, Німеччина) і танідами екстракту квебрахо. При цьому на початковій стадії рідинного оздоблювання шкіряного напівфабрикату в результаті взаємодії нано-SiO₂ з інгредієнтами композиції відбувається зменшення розміру частинок кремнезему А-300 та підвищення їх хімічної активності [18]. Завершується оброблення зразків фіксацією реагентів у структурі напівфабрикату при зниженні рН робочого розчину алюмокалієвим галуном до

4,0–4,2 з наступним промиванням упродовж 10 хв. За діючою технологією фіксація реагентів виконується розчином мурашиної кислоти. Рідинне оздоблювання шкіряного напівфабрикату завершується сушильно-зволожувальними процесами.

Фізико-хімічні показники отриманих зразків визначали після їх кондиціювання за методиками [16]. Зокрема, гідротермічна стійкість шкіри визначається візуально за ефектом початку скорочення зразка у водно-гліцериновій суміші при швидкості його нагрівання 2–3 °/хв. Пористість напівфабрикату – за відношенням об'єму пор напівфабрикату, встановленого з використанням авіаційного гасу, до його уявного об'єму; об'ємний вихід – за об'ємом зразка, що містить 100 г білка; повітропроникність – за об'ємом повітря при різниці тисків з обох боків зразка 1 кПа; фізико-механічні показники шкіри – за допомогою приладу ПЖУ-12М і розривної машини моделі РТ-250М за швидкості деформування зразка 90 мм/хв. Вихід площі напівфабрикату вимірювали на електронній машині моделі 07179/P1 фірми Svit, Чехія. Результати визначення фізико-хімічних властивостей отриманого шкіряного матеріалу за розробленою технологією наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Фізико-хімічні властивості пластифікованого шкіряного матеріалу

Показник	Значення показника за технологією		
	дослідною 1	дослідною 2	діючою
Масова частка, %:			
– вологи	13,7	14,1	13,9
– голинної речовини	68,9	68,1	67,7
– золи	6,5	7,6	6,7
– оксиду хрому (III)	4,1	4,0	4,3
– речовин, що екстрагуються органічними розчинниками	6,4	6,7	7,4
– зв'язані органічні дубильні речовини	13,8	13,9	14,7
Температура зварювання напівфабрикату, °С	113,0	113,0	111,0
Об'ємний вихід шкіри, см ³ /100 г ГР	234,0	239,0	227,0
Пористість зразків, %	57,0	55,0	49,0
Повітропроникність, см ³ /(см ³ /см ² ·год.)	253,0	249,0	237,0
Межа міцності при розтягуванні, МПа	21,7	22,5	21,3
Відносне видовження при навантаженні 10 МПа, %	39,0	37,3	21,0
Відносне видовження при розриві, %	61,0	60,0	57,0
Жорсткість шкіряного напівфабрикату, сН	19,0	21,0	28,0
Вихід площі шкіряного матеріалу, %	105,1	106,7	100,0

Як свідчать одержані дані за хімічним складом сформований шкіряний матеріал практично не відрізняється від зразків, отриманих за діючою технологією. За пружно-пластичними властивостями досліджений шкіряний матеріал переважає зразки діючої технології. Особливо це стосується розривного видовження при мінімальній його жорсткості, що сприяє підвищеному виходу площі шкіряного матеріалу внаслідок ефективно проведених структурних процесів у ензимно-обробленому колагені дерми і фіксації її елементів у об'ємі напівфабрикату. Отже, за комплексом фізико-хімічних і експлуатаційних показників досліджений шкіряний матеріал, сформований за розробленою технологією відповідає вимогам до шкір для верху взуття і міжнародного стандарту систем управління якістю «ISO 9001:2008».

Висновки. Досліджено процес формування шкіряного матеріалу з використанням ензимів гідролітичної дії. Встановлено залежності жорсткості й міцності від витрат ензимів.

Оптимальний пластифікаційний вплив на структуру шкіряного матеріалу спостерігається при використанні суміші ензимів за витрати 0,2% маси напівфабрикату. При цьому отриманий напівфабрикат характеризується зниженням жорсткості і підвищенням розривної міцності відповідно на 20,0 і 11,0% порівняно зі зразками необробленими ензимами. Розроблена технологія дає можливість отримати еластичний шкіряний матеріал меншої жорсткості на 33–47% і вищого об'ємного виходу на 5,3%. За комплексом фізико-хімічних властивостей отриманий шкіряний матеріал за розробленою технологією характеризується зменшеною витратою хімічних реагентів на 27,0% при збільшеному виходу його площі на 5,1–6,7%. Отримані шкіри за комплексом експлуатаційних і технологічних властивостей відповідає вимогам ДСТУ 2726-94 на шкіри для верху взуття. Ензимне оброблення шкіряного напівфабрикату хромового дублення може бути ефективно використано при розробленні інноваційних технологій виробництва еластичних шкіряних матеріалів для виготовлення виробів широкого асортименту. В подальшому дослідження має бути спрямоване на оптимізацію складу додублювально-наповнювальних композицій за умови використання ензимів.

References

Література

- Jayanthi, D., Victor, J. S., Chellan, R. et al. (2019). Green processing: Minimising harmful substances in leather making. *Environmental Science and Pollution Research*, (26), 6782–6790. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-04111-z>.
- Afsar, A., & Cetinkaya, F. (2008). Studies on the degreasing of skin using enzyme in liming process. *Indian Journal of Chemical Technology*, 15(5), 507–510.
- Zhang, X., Gao, M., Zhang, C., & Peng, B. (2025). Enzymatic processes for animal hide/skin collagen fiber purification processing: Recent progress, challenges and recommendations. *Bioresource Technology*, 418, 131955. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131955>.
- Širvaitytė, J., Valeika, V., Beleška, K., & Valeikienė, V. B. (2006). Bating of pelts after deliming with peracetic acid. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Chemistry*, 55(2), 93–100. DOI: <https://doi.org/10.3176/chem.2006.2.06>.
- Wang, C., Feng, S., & Wu, J. (2011). Preparation of organosilicone modified palm oil fatliquor. *JALCA*, 106(5), 161–169.
- Hao, D., Wang, X., Liang, S., Yue, O., Liu, X., Hao, D., & Dang, X. (2023). Sustainable leather making – An amphoteric organic chrome-free tanning agents based on recycling waste leather. *Science of The Total Environment*, 867, 161531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161531>.
- Leather International (n.d.). New fatliquor for soft articles from TFL. URL: <https://www.leatherinternational.com/>
- Jayanthi D., Victor J. S., Chellan R. et al. Green processing: minimising harmful substances in leather making. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 6782–6790. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-04111-z>.
- Afsar A., Cetinkaya F. Studies on the degreasing of skin using enzyme in liming process. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2008. № 15(5). 507–510.
- Zhang X., Gao M., Zhang C., Peng B. Enzymatic processes for animal hide/skin collagen fiber purification processing: Recent progress, challenges and recommendations. *Bioresource Technology*. 2025. № 418. 131955. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131955>.
- Širvaitytė J., Valeika V., Beleška K., Valeikienė V. Bating of pelts after deliming with peracetic acid. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Chemistry*. 2006. № 55 (2). P. 93–100. DOI: <https://doi.org/10.3176/chem.2006.2.06>.
- Wang C., Feng S., Wu J. Preparation of organosilicone modified palm oil fatliquor. *JALCA*. 2011. Vol. 106. № 5. P. 161–169.
- Hao D., Wang X., Liang S., Yue O., Liu X., Hao D., Dang X. Sustainable leather making – An amphoteric organic chrome-free tanning agents based on recycling waste leather. *Science of The Total Environment*. 2023. № 867. 161531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161531>.
- New fatliquor for soft articles from TFL. *Leather International*. URL: <https://www.leatherinternational.com/>

8. Ma, J. Z., & Lu, H. (2008). Elasticity studies on leather retanned with various types of acrylic polymers. *JALCA*, 103(11), 363–369.
9. Andreieva, O. A., Pervaia, N. V., Loshkarova, I. I., & Chumakova, N. O. (2021). Doslidzhennia vlastyvostei, osoblyvostei struktury i tekhnolohichnykh mozhlyvostei novykh polimernykh materialiv dlia napovnuvannia-dodubliuvannia shkiry [Study of properties, structural features and technological capabilities of new polymer materials for filling-retanning of leather]. *Visnyk KhNU. Seriya: Tekhnichni nauky*, 3(297), 162–167. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-162-167> [in Ukrainian].
10. Chen, Y., Fan, H., & Shi, B. (2011). Nanotechnologies for leather manufacturing: A review. *JALCA*, 106(8), 260–273.
11. Zhang, X., Liu, Q., & Zhang, W. (2006). Nanocomposites of acrylate-organsilicon resin/layered silicate for leather finishing. *JSLTC*, 90(6), 250–253.
12. Sultana, R., Rashid, T. U., & Rahman, M. M. (2026). Sustainable leather processing: A critical review of emerging green technologies and practices. *Sustainable Futures*, 11, 101562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.101562>.
13. Sahu, B., Ramesh, A., & Zameer, F. (2025). Impact of nanomaterials on leather: A nano-Saga from processing to application. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 27(10), 5855–5882. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02912-0>.
14. Mokrousova, E., Dzyazko, Y., Volkovich, Y., & Nikolskaya, N. (2016). Hierarchical structure of the derma affected by chemical treatment and filling with bentonite: Diagnostics with a method of standard contact porosimetry. In: O. Fesenko & L. Yatsenko (Eds.), *Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications* (Vol. 183, pp. 277–290). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4_23.
15. Varbanets, L. D., Avdiuk, K. V., & Borzova, N. V. (n.d.). Mikrobni alpha-amylazy: vydilennia, vlastyvosti, praktychne zastosuvannia [Microbial alpha-amylases: isolation, properties, practical application]. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/3911> [in Ukrainian].
16. Danylkovych, A. H. (2006). Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra [Workshop on the chemistry and technology of leather and fur]. 2nd ed. Kyiv. 340 p. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/33679> [in Ukrainian].
17. Danylkovych, A. H., Bilinskyi, S. O., & Kudziieva, S. Yu. (2016). Vykorystannia vysokodispersnoho oksydu kremniiu v tekhnolohii vyhotovlennia shkirianoho napivfabrykatu [The use of highly dispersed silicon oxide
8. Ma J. Z., Lu H. Elasticity studies on leather retanned with various types of acrylic polymers. *JALCA*. 2008. V. 103, № 11. P. 363–369.
9. Андреева О. А., Первая Н. В., Лошкарёва И. И., Чумакова Н. О. Дослідження властивостей, особливостей структури і технологічних можливостей нових полімерних матеріалів для наповнювання-додублювання шкіри. *Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки*. 2021. № 3 (297). С. 162–167. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-162-167>.
10. Chen Y., Fan H., Shi B. Nanotechnologies for leather manufacturing: A review. *JALCA*. 2011. V. 106, № 8. P. 260–273.
11. Zhang X., Liu Q., Zhang W. Nanocomposites of acrylate-organsilicon resin/layered silicate for leather finishing. *JSLTC*. 2006. Vol. 90(6), № 6. P. 250–253.
12. Sultana R., Rashid T. U., Rahman M. M. Sustainable leather processing: A critical review of emerging green technologies and practices. *Sustainable Futures*. 2026. № 11. 101562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.101562>.
13. Sahu B., Ramesh A., Zameer, F. Impact of nanomaterials on leather: a nano-Saga from processing to application. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2025. № 27(10). P. 5855-5882. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02912-0>.
14. Mokrousova E., Dzyazko Y., Volkovich Y., Nikolskaya N. Hierarchical Structure of the Derma Affected by Chemical Treatment and Filling with Bentonite: Diagnostics with a Method of Standard Contact Porosimetry. In: Fesenko, O., Yatsenko, L. (eds). *Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications. Springer Proceedings in Physics*. Springer, Cham, 2016. Vol. 183. P. 277–290. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4_23.
15. Варбанець Л. Д., Авдіюк К. В., Борзова Н. В. Мікробні α-амілази: виділення, властивості, практичне застосування. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/3911>.
16. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра. 2 вид., перероб. і доп. Київ, 2006. 340 с. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/33679>.
17. Данилкович А. Г., Білінський С. О., Кудзієва С. Ю. Використання високодисперсного оксиду кремнію в технології виготовлення шкіряного

in the technology of leather semi-finished product production]. *Visnyk KhNU. Seriya: Tekhnichni nauky*, 6(243), 112–116 [in Ukrainian].

18. Danylkovych, A. H., & Bilinskyi, S. O. (2019). Zastosuvannya nano-SiO₂ v tekhnologii vyrobnytstva elastychnykh shkir [Application of nano-SiO₂ in the technology of elastic leather production]. *Naukovi pratsi NUKhT*, 2, 48–57. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/14404> [in Ukrainian].

напівфабрикату. *Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки*. 2016. № 6(243). С. 112–116.

18. Данилкович А. Г., Білінський С. О. Застосування нано-SiO₂ в технології виробництва еластичних шкір. *Наукові праці НУХТ*. 2019. № 2. С. 48–57. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/14404>.

DANYLKOYCH ANATOLII

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Biotechnology, Leather and Fur,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-5707-0419>

Scopus Author ID: 55339122700

E-mail: ag101@ukr.net

OKHMAT OLENA

PhD of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Biotechnology, Leather and Fur,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-0927-8706>

Scopus Author ID: 57194089217

E-mail: oxmat.oa@knutd.edu.ua

Anatolii DANYLKOYCH, Olena OKHMAT

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

PRODUCTION OF ELASTIC LEATHER FOR FOOTWEAR

Purpose. Improving the elasticity of leather for shoe uppers through the use of hydrolytic enzymes in the retanning and filling processes.

Methodology. The study employed the asymmetric fringe method to assemble experimental batches of samples, which were then subjected to enzymatic treatment under controlled temperature conditions. The effectiveness of creating an elastic structure was evaluated through the analysis of elastic-plastic properties, chemical, physical and mechanical indicators.

Findings. The effect of enzyme dosage on the elastic-plastic properties of leather materials was investigated, as were their physical and mechanical properties. It was found that a mixture of hydrolytic enzymes at an optimal dosage of 0.2% of the semi-finished product's mass was most effective in increasing its elasticity. Using the experimental technology enables the production of elastic leather with 33–47% lower stiffness and 5.3% higher yield than standard technology. There was also an increase in the yield of finished leather area by 5.1–6.7%, with a simultaneous reduction in chemical reagent consumption by 27.0%.

Originality. The nature of the dependence of the elastic-plastic and physical-mechanical properties of leather materials on the type and concentration of enzymes used to treat them has been established. The synergistic effect of using a mixture of hydrolytic enzymes at the liquid finishing stage to plasticize the dermis structure has been demonstrated.

Practical value. A resource-saving technology has been developed for producing elastic leather materials for shoe uppers. The results obtained can be used to develop new technologies for producing a wide range of leathers.

Keywords: chrome-tanned semi-finished product; enzymatic treatment; retanning; filling; syntan-tannin composition; properties.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.1.3>Received: 17.03.2026
Revised: 08.04.2026
Accepted: 23.04.2026

УДК 628.35:678.012

Олена ІЩЕНКО, Дарія КУЧИНСЬКА, Роман МОСКАЛЬ
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна**АЕРОБНА БІОРОЗКЛАДНІСТЬ ПЛІВКОВИХ
ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ КРОХМАЛЮ
ТА ПОЛІВІНІЛОВОГО СПИРТУ ЯК ЕКОЛОГІЧНО
БЕЗПЕЧНОЇ АЛЬТЕРНАТИВИ ДЛЯ ПАКУВАЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Мета. Метою роботи є експериментальне визначення ступеня кінцевої аеробної біологічної розкладності плівкового полімерного матеріалу на основі суміші крохмалю та полівінілового спирту (ПВС) у масовому співвідношенні 25:75 у водному середовищі методом закритого респірометра відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 14851:1999.

Методика. Дослідження проводились методом закритого манометричного респірометра Sapromat D12 (Voith, Німеччина) відповідно до ISO 14851:1999 (EN ISO 14851:2004). Загальна тривалість тесту - 99 діб; аналіз проводиться на проміжному етапі (43-тя доба). Реакційні флакони об'ємом 510 мл з об'ємом рідкої фази 164 мл інкубувались при температурі 30°C та атмосферному тиску 1010 гПа. Активний мул міської станції біологічного очищення стічних вод використали як інокулюм. Тест включав 12 флаконів: 2 контрольних (бланк, F₂), 2 флакони з еталонним матеріалом (мікрокристалічна целюлоза, F₃), 8 дослідних флаконів із тестовим матеріалом (F₉). Теоретичну потребу в кисні (ThOD) розраховували з елементного складу компонентів за формулою, наведеною у Додатку А до ISO 14851:1999.

Результати. Розраховані значення ThOD: для крохмалю (C₆H₁₀O₅)_n – 1185 мг/г, для ПВС (C₂H₄O)_n – 1818 мг/г, для суміші 25:75 – 1660 мг/г. Середнє значення для бланку на 43-ту добу склало 8,3 мг/л, що є прийнятним відповідно до вимог п. 10 стандарту. Еталонний матеріал (целюлоза) показав ступінь біорозкладності 61–68%, що підтверджує валідність тесту. Тестовий матеріал (крохмаль/ПВС 25:75) продемонстрував ступінь аеробної біодеградації від 38,4% до 55,7% для основної групи зразків (флакони 5, 6, 9–12). Лаг-фаза для тестового матеріалу становила близько 1,4 доби, що суттєво коротше порівняно з целюлозою (~7–8 діб).

Наукова новизна. Вперше виконано кількісну оцінку аеробної біорозкладності плівкового полімерного матеріалу на основі суміші крохмаль/ПВС 25:75 методом закритого респірометра (ISO 14851) у повному 99-добовому тесті. Визначено кінетичні характеристики біодеградації, зокрема тривалість лаг-фази, фази інтенсивної деградації та плато для кожного типу зразків.

Практична значимість. Отримані дані підтверджують суттєвий рівень аеробної біорозкладності матеріалу на основі суміші крохмаль/ПВС, що обґрунтовує перспективність його застосування як екологічно безпечного пакувального матеріалу відповідно до вимог сучасного екологічного законодавства Європейського Союзу та принципів циркулярної економіки.

Ключові слова: аеробна біорозкладність; крохмаль; полівініловий спирт; закритий респірометр; ISO 14851; пакувальні матеріали.

Вступ. Щорічно у світі виробляється понад 430 млн тонн пластику, близько двох третин якого після першого використання стає відходами. Пакувальна галузь залишається найбільшим споживачем синтетичних полімерів – переважно поліетилену (ПЕ), поліпропілену (ПП), полістиролу (ПС) та полівінілхлориду (ПВХ). Ці матеріали практично не піддаються аеробному мікробному розкладанню в природних умовах, накопичуючись у навколишньому середовищі на сотні років [1, 2].

На тлі зростаючого регуляторного тиску – зокрема Директиви ЄС 2019/904 щодо одноразових пластиків та Регламенту (ЄС) 2022/1616 про вимоги до пакувальних матеріалів – у промисловому та науковому середовищі різко зріс інтерес до біорозкладних пакувальних матеріалів [3, 4]. Одним із найперспективніших напрямів є розробка полімерних композитів

на основі натуральних та синтетичних полімерів, зокрема крохмалю та полівінілового спирту (ПВС) [5].

Крохмаль є одним з найпоширеніших природних полімерів і легко піддається мікробній деградації завдяки наявності α -глікозидних зв'язків [6]. Проте у чистому вигляді крохмальні плівки мають недостатню механічну міцність та підвищену гігроскопічність. Введення ПВС у полімерну матрицю значно покращує фізико-механічні властивості матеріалу – міцність на розрив, еластичність та бар'єрні характеристики при збереженні певного рівня біорозкладності [7, 8]. Питання про реальний ступінь аеробної біорозкладності таких композитів у водному середовищі потребує стандартизованих кількісних досліджень.

Метод закритого респірометра (ISO 14851:1999) серед методів кількісної оцінки біорозкладності пластиків є одним з найбільш інформативних: він дозволяє безперервно реєструвати споживання кисню мікроорганізмами в аеробних умовах і на цій основі розраховувати ступінь мінералізації тестованого матеріалу [9]. Метод широко застосовується для оцінки компостованих і водорозчинних полімерів та прийнятий як нормативний у країнах ЄС і Японії [10].

Незважаючи на значну кількість публікацій щодо фізико-механічних властивостей плівок крохмаль/ПВС, результати стандартизованих 99-добових випробувань їх аеробної біорозкладності методом закритого респірометра у відкритій літературі практично відсутні. Більшість доступних даних стосується методів ґрунтової інкубації або скорочених протоколів [5-8]. Це зумовлює актуальність проведення повноцінного випробування за ISO 14851 і виявляє наукову прогалину, якій присвячена дана стаття.

Постановка завдання. Метою статті є визначення ступеня кінцевої аеробної біорозкладності плівкового матеріалу на основі суміші крохмаль/ПВС у масовому співвідношенні 25:75 за результатами 43-добового (проміжного) відрізка 99-добового стандартного тесту методом закритого респірометра відповідно до ISO 14851:1999, а також: розрахунок теоретичної потреби в кисні (ThOD) для компонентів суміші та їх поєднання; оцінка кінетики біодеградації (лаг-фази, активної деградації та плато); верифікація тесту за еталонним матеріалом; аналіз відтворюваності результатів між паралельними зразками.

Результати дослідження.

Умови проведення тесту. Тест проводився з використанням закритого манометричного респірометра Sapromat D12 (Voith, Німеччина) з автоматичною реєстрацією споживання кисню. Основні параметри тестування наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Умови та параметри проведення респірометричного тесту (ISO 14851:1999)

Параметр	Значення
Метод	Закритий манометричний респірометр
Стандарт	ISO 14851:1999 / EN ISO 14851:2004
Дата початку / стану	21.02.2024 / 05.04.2024 (43-тя доба)
Загальна тривалість тесту	99 діб
Температура інкубації	30 ± 1 °C
Атмосферний тиск	1010 гПа
Об'єм флакона / рідкої фази	510 / 164 мл
Вимірювальний діапазон приладу	413 мг/л
Кількість флаконів (бланк / целюлоза / зразок)	2 / 2 / 8
Розчин інокулу	Активний мул міської станції очищення стічних вод
Еталонний матеріал	Мікрокристалічна целюлоза (F ₃)

Розрахунок теоретичної потреби в кисні (ThOD). ThOD розраховувався за формулою (1) Додатку А до ISO 14851:1999 для речовини $C_hH_nCl_lN_nS_pP_sNa_{na}O$ з молярною масою M_r :

$$\text{ThOD} = 16 \times [2c + 0,5(h - cl - 3n) + 3s + 2,5p + 0,5na - o] / M_r, \quad (1)$$

де c, h, o, n, s, p, na, cl – кількість атомів відповідних елементів у формулі речовини;
 M_r – молярна маса (г/моль).

Для крохмалю $(C_6H_{10}O_5)_n$ ($M_r = 162$ г/моль; $c = 6, h = 10, o = 5$):

$$\text{ThOD}_{\text{мкнаһ<nonnə}} = 16 \times [2 \times 6 + 0,5 \times 10 - 5] / 162 = 1185 \text{ мг/г.}$$

Для полівінілового спирту $(C_2H_4O)_n$ ($M_r = 44$ г/моль; $c = 2, h = 4, o = 1$):

$$\text{ThOD}_{\text{рв<}} = 16 \times [2 \times 2 + 0,5 \times 4 - 1] / 44 = 1818 \text{ мг/г.}$$

Для суміші крохмаль/ПВС у масовому співвідношенні 25:75:

$$\text{ThOD}_{\text{nt}^{\text{cl}}} = 0,25 \times 1185 + 0,75 \times 1818 = 1660 \text{ мг/г.}$$

Розраховані значення ThOD узагальнено в табл. 2.

Таблиця 2

Теоретична потреба в кисні (ThOD) для компонентів та суміші

Матеріал	Молекулярна формула	M_r , г/моль	ThOD, мг/г	Частка у суміші
Крохмаль	$(C_6H_{10}O_5)_n$	162	1 185	25%
Полівініловий спирт (ПВС)	$(C_2H_4O)_n$	44	1 818	75%
Суміш крохмаль/ПВС 25:75	–	–	1 660	100%

Кінетика споживання кисню. Криві кінетики біохімічного споживання кисню (БСК) для усіх флаконів наведено на рис. 1. Кількість вимірювань – 159; інтервал реєстрації – 396 хв (~6,6 год).

Тест включав 12 флаконів трьох типів: бланк (F_2 , флакони 1–2) – лише мінеральне середовище з інокулом без тестового матеріалу; еталонний матеріал (F_3 , флакони 3–4) – мікрокристалічна целюлоза в мінеральному середовищі з інокулом; тестовий матеріал (F_9 , флакони 5–12) – суміш крохмаль/ПВС у масовому співвідношенні 25:75 у мінеральному середовищі з інокулом.

Бланк (F_2). Середнє значення БСК у флаконах-бланках на кінець 43-добового спостереження склало 8,3 мг/л (флакон 1 – 4,5 мг/л, флакон 2 – 12,2 мг/л). Відповідно до вимог п. 10 ISO 14851:1999, це значення є прийнятним (не перевищує допустиму верхню межу для інокулу з концентрацією 30 мг/л сухої речовини – близько 60 мг/л). Споживання кисню бланком відображає ендогенне дихання мікроорганізмів і використовується для поправки при розрахунку BOD_s .

Еталонний матеріал – целюлоза (F_3). Флакони 3 та 4 з еталонним матеріалом показали чітко виражену S-подібну криву біодеградації: незначне споживання кисню протягом 7–8 діб (lag-фаза), потім різке зростання БСК з ~27-ї доби до ~35-ї доби (фаза активної деградації) та фазу плато (стабілізація на рівні 440–490 мг/л). Подібна кінетика є типовою для целюлози в присутності адаптованого активного мулу [9, 10].

Тестовий матеріал – суміш крохмаль/ПВС (F_9). Основна група флаконів (5, 6, 9–12) демонструє значно коротшу lag-фазу (~1,4 доби) порівняно з еталонною целюлозою, що свідчить про легкодоступність субстрату для мікроорганізмів, насамперед завдяки крохмальній компоненті. Впродовж 5-10-тої доби споживання кисню досягало 300–500 мг/л, а до 30-ї доби більшість флаконів вийшла на фазу плато.

Флакони 7 та 8 показали аномальну кінетику: флакон 7 – різке початкове зростання БСК до 179 мг/л за перші 2,5 доби із подальшим зниженням до рівня 60–110 мг/л; флакон 8 – зростання до 350 мг/л (до 22-ї доби) із подальшим зниженням до ~220 мг/л. Оскільки зафіксовані БСК є кумулятивними і фізично не можуть зменшуватись у закритій системі без зовнішнього впливу, вірогідними причинами аномалії є мікротечії у з'єднаннях флакону або нестабільність роботи манометричної головки. Ці флакони виключені з розрахунку середнього ступеня біодеградації.

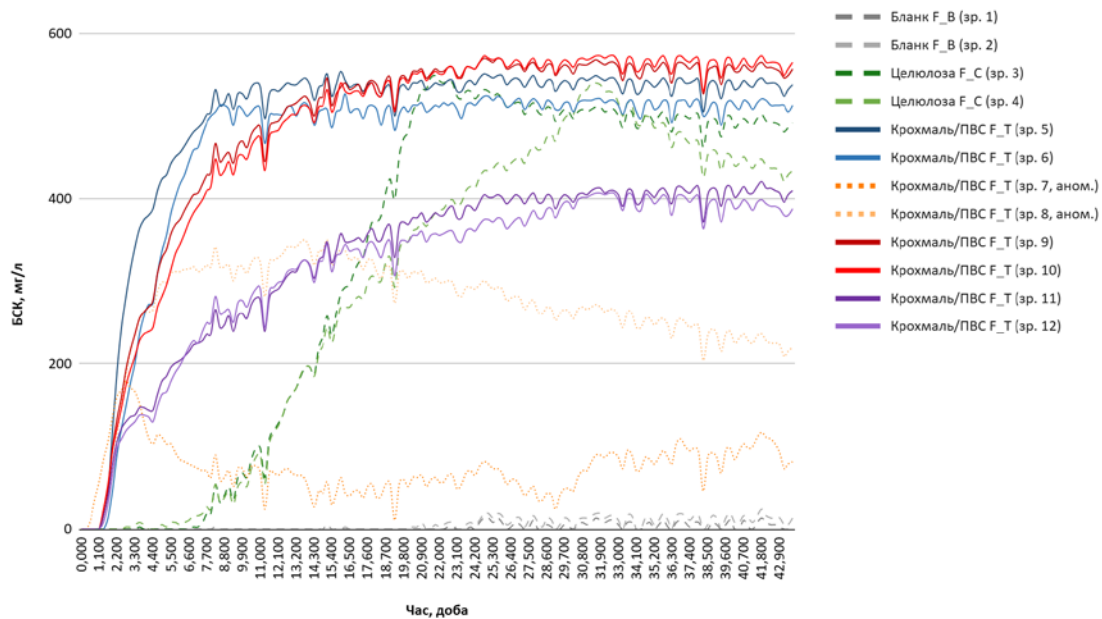


Рис. 1. Кінетичні криві споживання кисню (БСК, мг/л) у флаконах з тестовим матеріалом (крохмаль/ПВС 25:75, F₉), еталонною целюлозою (F₃) та бланком (F₂) за 43-добовий період спостереження (ISO 14851:1999)

Розрахунок ступеня біодеградації. Ступінь аеробної біорозкладності D_t розраховується відповідно до рівнянь (2) та (3) ISO 14851:1999:

$$BOD_s = (BOD_t - BODB) / \rho_t^c, \quad (2)$$

$$D_t = (BOD_s / ThOD) \times 100\%, \quad (3)$$

де BOD_s – питоме БСК тестового матеріалу (мг O_2 / мг матеріалу); BOD_t – БСК у флаконі F₉ на момент t , мг/л; $BODB$ – БСК бланку F₂ на той самий момент, мг/л; ρ_t^c – концентрація тестового матеріалу у реакційному флаконі за органічним вуглецем, мг/л; $ThOD$ – теоретична потреба в кисні, мг/г.

Концентрацію тестового матеріалу у флаконах (600 мг/л за органічним вуглецем) визначено розрахунковим методом на підставі поведінки еталонного матеріалу (целюлоза, $ThOD = 1185$ мг/г) за умови $D_0 \sim 65\%$.

Підставляючи значення для 43-ї доби тесту, отримано результати, наведені у табл. 3.

Для основної групи валідних зразків тестового матеріалу (флакони 5, 6, 9–12) середній ступінь аеробної біорозкладності на 43-тю добу склав 48,8% (діапазон: 38,4–55,7%). Оскільки тест не завершено (залишається ще 56 діб), кінцеве значення може перевищити отримані проміжні показники. Ступінь біодеградації еталонного матеріалу (целюлоза, F₃) склав 61–68%, що задовольняє критерій валідності тесту за п. 10 стандарту ISO 14851:1999 (вимога: $D \geq 60\%$).

Характерною особливістю кінетики тестового матеріалу є коротка lag-фаза (~1,4 доби) порівняно з целюлозою (~7–8 діб). Це підтверджує, що крохмальна складова суміші є легкодоступним субстратом для мікробного консорціуму активного мулу. ПВС-матриця, попри більш складну структуру, також піддається аеробній деградації завдяки специфічним ферментам (ПВА-оксидазам та вторинним спиртовим дегідрогеназам бактерій роду *Pseudomonas*, *Bacillus* та ін.) [7, 8].

Таблиця 3

Результати розрахунку ступеня аеробної біорозкладності (43-тя доба)

Флакони №	Роль у тесті	Плато БСК, мг/л	BOD ₁ (скор.), мг/л	BOD _s , мг/мг	D _t , %
1	Бланк (F ₂)	4,5	–	–	–
2	Бланк (F ₂)	12,2	–	–	–
3	Целюлоза (F ₃)	491,8	483,5	0,806	68,0
4	Целюлоза (F ₃)	442,4	434,0	0,723	61,0
5	Крохмаль/ПВС (F ₉)	537,0	528,7	0,881	53,1
6	Крохмаль/ПВС (F ₉)	512,2	503,9	0,840	50,6
7	Крохмаль/ПВС (F ₉)*	94,2	85,8	0,143	8,6*
8	Крохмаль/ПВС (F ₉)*	228,1	219,8	0,366	22,1*
9	Крохмаль/ПВС (F ₉)	556,0	547,7	0,913	55,0
10	Крохмаль/ПВС (F ₉)	562,9	554,6	0,924	55,7
11	Крохмаль/ПВС (F ₉)	408,8	400,4	0,667	40,2
12	Крохмаль/ПВС (F ₉)	390,9	382,6	0,638	38,4

* Флакони 7 та 8 виключено з розрахунку середнього значення внаслідок аномальної кінетики (ймовірна нецільність з'єднань або несправність манометричної головки).

Розбіжність між результатами флаконів однієї серії (наприклад, 5 та 6: D = 53,1% і 50,6%; 9 та 10: 55,0% і 55,7%) є незначною та знаходиться в межах природної варіабельності, характерної для тестів *in vitro* з використанням живих мікробних культур. Відносне стандартне відхилення між парами флаконів не перевищує 3%.

Висновки. У роботі проведено проміжну (43-тя доба з 99) кількісну оцінку аеробної біорозкладності плівкового полімерного матеріалу на основі суміші крохмаль/ПВС 25:75 методом закритого респірометра відповідно до ISO 14851:1999. Отримано такі основні результати:

1. Розраховані теоретичні потреби в кисні: ThOD(крохмаль) = 1185 мг/г, ThOD(ПВС) = 1 818 мг/г, ThOD(суміш 25:75) = 1660 мг/г.

2. Тест є валідним: ступінь біодеградації еталонної целюлози сягнув 61–68% (норма ≥ 60%), а БСК бланку залишилося в допустимих межах (8,3 мг/л).

3. Для основної групи валідних зразків тестового матеріалу (флакони 5, 6, 9–12) ступінь аеробної біодеградації суміші крохмаль/ПВС на 43-ту добу склав у середньому 48,8% (38,4–55,7%), що свідчить про суттєву біорозкладність матеріалу. Два зразки з тестовим матеріалом (флакони № 7 та № 8) виключені з аналізу через аномальну кінетику, ймовірно, спричинену несправністю обладнання.

4. Lag-фаза для тестового матеріалу (~1,4 доби) є значно коротшою порівняно з целюлозою (~7–8 діб), що підтверджує інтенсивне початкове мікробне засвоєння крохмальної складової.

5. Отримані результати науково обґрунтовують екологічну безпечність матеріалу на основі крохмаль/ПВС 25:75 з позиції аеробної біорозкладності та підтверджують перспективність його використання як пакувального матеріалу зниженого екологічного навантаження відповідно до вимог ЄС щодо сталого пакування.

Перспективами подальших досліджень є: завершення повного 99-добового тесту та визначення кінцевого ступеня мінералізації; розрахунок балансу вуглецю за методологією Додатку Е до ISO 14851; дослідження біодеградації при варіюванні температури та складу інокулу; оцінка механічних властивостей плівки після часткової деградації.

References

Література

- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), Art. e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
 - European Commission (2018). A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. Brussels. COM(2018)28 final.
 - Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment. *Official Journal of the EU*. 2019. L 155, p. 1–19.
 - Regulation (EU) 2022/1616 of the European Parliament and of the Council on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with food. *Official Journal of the EU*. 2022. L 243.
 - Pelissari, F. M., Yamashita, F., & Grossmann, M. V. E. (2011). Extrusion parameters related to starch/chitosan active films properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(4), 702–710. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02533.x>.
 - Tang, X., & Alavi, S. (2011). Recent advances in starch, polyvinyl alcohol based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. *Carbohydrate Polymers*, 85(1), 7–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.01.030>.
 - Chiellini, E., Corti, A., D'Antone, S., & Solaro, R. (2003). Biodegradation of poly (vinyl alcohol) based materials. *Progress in Polymer Science*, 28(6), 963–1014. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(02\)00149-1](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(02)00149-1).
 - Wang, J. L., Cheng, F., & Zhu, P. X. (2014). Structure and properties of urea-plasticized starch films with different urea contents. *Carbohydrate polymers*, 101, 1109–1115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.050>.
 - ISO 14851:1999. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium – Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer. Geneva: ISO. 25 p.
 - EN ISO 14851:2004. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium – Method by measuring the
- Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 2017. Vol. 3, No. 7. Art. e1700782. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
 - A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. Brussels: European Commission, 2018. COM(2018)28 final.
 - Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment. *Official Journal of the EU*. 2019. L 155, p. 1–19.
 - Regulation (EU) 2022/1616 of the European Parliament and of the Council on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with food. *Official Journal of the EU*. 2022. L 243.
 - Pelissari F. M., Yamashita F., Grossmann M. V. E. Extrusion and thermo pressing of starch/polyvinyl alcohol blends films. *Industrial Crops and Products*. 2011. Vol. 33. P. 648–655. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02533.x>.
 - Tang X., Alavi S. Recent advances in starch, polyvinyl alcohol based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. *Carbohydrate Polymers*. 2011. Vol. 85, No. 1. P. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.01.030>.
 - Chiellini E., Corti A., D'Antone S., Solaro R. Biodegradation of poly (vinyl alcohol) based materials. *Progress in Polymer Science*. 2003. Vol. 28, No. 6. P. 963–1014. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(02\)00149-1](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(02)00149-1).
 - Wang J., Cheng F., Zhu P. Structure and properties of urea-plasticized starch films with different urea contents. *Carbohydrate Polymers*. 2014. Vol. 101. P. 1109–1115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.050>.
 - ISO 14851:1999. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium – Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer. Geneva: ISO, 1999. 25 p.
 - EN ISO 14851:2004. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium – Method by measuring the

oxygen demand in a closed respirometer. Brussels: CEN.

11. Żuchowska, D., Steller, R., & Meissner, W. (1998). Structure and properties of degradable polyolefin-starch blends. *Polymer Degradation and Stability*, 60(2–3), 471–480. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(97\)00110-9](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(97)00110-9).

12. Kumar, A., Saranyadevi, S., Selva Kumar, T., Neupane, S., Pawde, S. V., Liu, S., Ali, S., & Wei, S. (2025). Starch based biodegradable packaging systems and their interactions with food components, shelf-life implications: a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, (13), 101067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.101067>.

oxygen demand in a closed respirometer. Brussels: CEN, 2004.

11. Zuchowska D., Steller R., Meissner W. Structure and properties of degradable polyolefin–starch blends. *Polymer Degradation and Stability*. 1998. Vol. 60. P. 471–480. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(97\)00110-9](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(97)00110-9).

12. Kumar A., Saranyadevi S., Selva Kumar T., Neupane S., Pawde S. V., Liu S., Ali S., Wei S. Starch based biodegradable packaging systems and their interactions with food components, shelf-life implications: a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2025. Vol.13. Art. 101067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.101067>.

ISHCHENKO OLENA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Industrial Pharmacy,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-9510-6005>

Scopus Author ID: 57200013816

Researcher ID: GYV-0809-2022

E-mail: ishhenko.ov@knuud.edu.ua

KUCHYNSKA DARIA

PhD, Senior Researcher,
Department of Industrial Pharmacy,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0007-5928-6639>

Scopus Author ID: 59897040200

E-mail: kuchynska.da@knuud.edu.ua

MOSKAL ROMAN

Postgraduate Student,
Department of Chemical Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0006-1004-5917>

E-mail: roma.moskal95@gmail.com

Olena ISHCHENKO, Daria KUCHYNSKA, Roman MOSKAL

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

AEROBIC BIODEGRADABILITY OF FILM POLYMER MATERIALS BASED ON STARCH AND POLYVINYL ALCOHOL AS AN ECO-FRIENDLY ALTERNATIVE TO CONVENTIONAL PACKAGING MATERIALS

Purpose. The aim of this study is the experimental determination of the degree of ultimate aerobic biodegradability of a film polymer material based on a starch/polyvinyl alcohol (PVA) blend in a 25:75 mass ratio in an aqueous medium, using the closed respirometer method in accordance with the requirements of international standard ISO 14851:1999.

Methodology. The study was conducted using a closed manometric respirometer Sapromat D12 (Voith, Germany) in accordance with ISO 14851:1999 (EN ISO 14851:2004). The total test duration was 99 days; interim analysis was performed at day 43. Reaction vessels of 510 mL with a liquid phase volume of 164 mL were incubated at 30°C and an atmospheric pressure of 1010 hPa. Activated sludge from a municipal biological wastewater treatment plant served as the inoculum. The test comprised 12 vessels: 2 control vessels (blank, F₂), 2 vessels with reference material (microcrystalline cellulose, F₃), and 8 test vessels containing the test material (F₉). The theoretical oxygen demand (ThOD) was calculated from the elemental composition of the components using the formula provided in Annex A of ISO 14851:1999.

Findings. The calculated ThOD values were as follows: for starch (C₆H₁₀O₅)_n – 1185 mg/g; for PVA (C₂H₄O)_n – 1818 mg/g; and for the 25:75 blend – 1660 mg/g. The mean blank value at day 43 was 8.3 mg/L, which is acceptable in accordance with the requirements of Clause 10 of the standard. The reference material

(cellulose) exhibited a biodegradability degree of 61–68%, confirming the validity of the test. The test material (starch/PVA 25:75) demonstrated a degree of aerobic biodegradation ranging from 38.4% to 55.7% for the primary sample group (vessels 5, 6, 9–12). The lag phase for the test material was approximately 1.4 days, which is substantially shorter than that observed for cellulose (~7–8 days).

Originality. For the first time, a quantitative assessment of the aerobic biodegradability of a film polymer material based on a starch/PVA 25:75 blend has been performed using the closed respirometer method (ISO 14851) in a complete 99-day test. The biodegradation kinetics characteristics were established, including the duration of the lag phase, the active degradation phase, and the plateau phase for each sample type.

Practical value. The data obtained confirm a substantial level of aerobic biodegradability of the starch/PVA blend-based material, which substantiates the potential of its application as an environmentally safe packaging material in accordance with the principles of the circular economy and the requirements of current European Union environmental legislation.

Keywords: aerobic biodegradability; starch; polyvinyl alcohol; closed respirometer; ISO 14851; packaging materials.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.1.4>

Received: 13.01.2025

Revised: 17.02.2025

Accepted: 09.04.2026

УДК 677.494

Артем КОЛОДІЙ, Вікторія ПЛАВАН, Ірина ЛЯШОК

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

**РЕГУЛЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ АКРИЛ-УРЕТАНОВИХ
ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Мета. Визначення можливості регулювання фізико-механічних властивостей акрил-уретанових полімерних матеріалів шляхом встановлення раціонального співвідношення компонентів у складі оздоблювальної композиції.

Методика. В роботі використали полімерні матеріали різних типів: CRILAT 4815 (Vinavil, Italy), Impranil DLP-R (Covestro, Germany). Для дослідження властивостей акрил-уретанових композицій, методом поливу з наступним висушуванням і кондиціонуванням отримали плівки товщиною $0,2 \pm 0,05$ мм за різного співвідношення сухого залишку акрилової (ПА) і поліуретанової (ПУ) дисперсії. Визначали модуль еластичності, максимальну міцність на розрив та відносне видовження при розтягуванні для акрил-уретанових плівок, а також їх здатність до набухання в етиловому спирті, бутилацетаті, чотирьоххлористому вуглеці.

Результати. Механічну поведінку акрил-уретанових полімерних плівок було проаналізовано у порівнянні з механічною поведінкою чистих поліуретанових і поліакрилатних полімерних плівок. Встановлено, що присутність 30–40% за вмістом сухого залишку поліуретану в акрил-поліуретановій композиції дозволяє досягти підвищення межі міцності плівки до 12,9–13,3 МПа при одночасному збільшенні її еластичності до 420–450%, на відміну від плівки з чистої акрилової дисперсії (межа міцності 10,5 МПа і відносне видовження 233,3%). Ймовірно таке підвищення межі міцності акрил-уретанових систем пов'язане з утворенням додаткових міжмолекулярних зв'язків, що супроводжується зниженням рухливості молекулярних ланцюгів. Можливість сильної міжмолекулярної взаємодії підтверджується підвищенням стійкості акрил-уретанових композицій до дії етилового спирту.

Наукова новизна. За результатами виконаних досліджень можна зробити висновок про те, що змінюючи вміст поліуретанів в акрил-уретанових полімерних плівках можливо забезпечити отримання текстильних покриттів з необхідними фізико-механічними характеристиками.

Практична значимість. Запропоновано застосування водно-дисперсійних акрил-уретанових систем для модифікування поверхні текстилю з метою надання виробам нових функціональних властивостей. Це дає змогу створювати конкурентоспроможні тканини з покращеними стабільними властивостями, зокрема технічного застосування.

Ключові слова: полімерні дисперсії; полімерні покриття; поліакрилат; поліуретан; акрил-уретанові дисперсії; фізико-механічні властивості.

Вступ. Властивості та застосування полімерних систем можна значно змінювати шляхом їх модифікації або кополімеризації з іншими полімерами, щоб характеристики отриманих матеріалів відповідали заздалегідь визначеним стандартам [1]. Таким чином, в останні роки докладаються значні зусилля для використання потенціалу різних кополімерів для змішування, а іноді й посилення корисних властивостей кожного компонента за рахунок послаблення небажаних характеристик [2]. Як показано в роботі [3], застосування сумішей полімерних дисперсій на основі поліуретанів є одним із способів отримання суцільних непористих водонепроникних «дихаючих» полімерних покриттів текстильних матеріалів.

Поліуретани знайшли широке застосування в різних галузях завдяки таким перевагам, як широкий діапазон гнучкості, висока стійкість до стирання та дії хімічних речовин, чудова стабільність у часі, зручність у нанесенні покриттів та догляді за ними, що робить поліуретани широко використовуваним класом полімерів [4, 5]. Незважаючи на видатні характеристики, поліуретани мають і низку недоліків, таких як високі виробничі витрати (головним чином через ізоціанатний компонент) або технологічні ускладнення, що виникають під час синтезу через високу реакційну здатність ізоціанатних груп до низки домішок (наприклад, води).

Наразі вторинні реакції зазвичай усуваються, а простим підходом до отримання матеріалів з покращеними властивостями є введення акрилових фрагментів у поліуретанову матрицю [6].

Традиційно поліакрилати широко використовуються як клеї або для отримання покриттів, оскільки такі полімери характеризуються низькою температурою склоподібного переходу, що робить їх придатними для обробки, оздоблення або очищення [7]. Крім того, широкий вибір доступних акрилових структур дозволяє розробляти та вибирати бажані фізичні властивості, не нехтуючи їх нижчою вартістю порівняно з поліуретанами. З іншого боку, є проблеми, пов'язані із застосуванням поліакрилатів, пов'язані з гнучкістю макромолекулярного ланцюга, що визначає обмежену механічну міцність. Авторами статті [8] пропонується застосування стирол-акрилових і уретанових композицій для покриття текстильних матеріалів, призначених для виготовлення спецодягу. Встановлено, що стирол-акриловий полімер та композиція на основі поліуретану і зшиваючого агента можуть бути використані для створення покриттів на текстильних матеріалах, для яких жорсткість не є основною характеристикою.

Однак, під час формування плівки може виникати проблема несумісності між різними типами полімерів, зокрема акриловими та поліуретановими. Тому актуальним завданням залишається встановлення раціональних співвідношень різних типів полімерів у складі плівки для отримання покриття з відповідними механічними характеристиками.

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення можливості регулювання фізико-механічних властивостей акрил-уретанових полімерних матеріалів шляхом встановлення раціонального співвідношення компонентів у складі оздоблювальної композиції. Кінцевою метою дослідження є розробка технології оздоблення волокнистих матеріалів на основі використання водно-дисперсійних акрилових і уретанових полімерів для надання поліпшених функціональних властивостей.

Результати дослідження та їх обговорення. Важливою особливістю полімерних матеріалів для покриттів текстильних виробів є досягнення хороших механічних властивостей. З цієї причини механічну поведінку вищезгаданих полімерних матеріалів було проаналізовано порівняно з механічною поведінкою чистих поліуретанових і поліакрилатних полімерних плівок.

Методологія дослідження. В роботі використали полімерні матеріали різних типів: CRILAT 4815 (Vinavil, Італія), Impranil DLP-R (Covestro, Німеччина). Вибір матеріалів обумовлений простотою їх застосування, доступністю на ринку, прийнятною ціною.

Акрилова дисперсія на водній основі CRILAT 4815 характеризується дуже малим розміром частинок. CRILAT 4815 не містить алкілфенол-етоксилатів (APEO-FREE), формальдегіду та розчинників, не має запаху. Impranil® DLP-R – це аніонна аліфатична поліефірно-поліуретанова дисперсія, яка підходить для використання у складі текстильних покриттів для верхнього одягу, багажно-технічних виробів. Має хорошу світлостійкість, забезпечує хорошу адгезію, має високий вміст твердих речовин і хорошу стабільність при перемішуванні. Результати порівняльної оцінки полімерних дисперсій різних типів наведені в роботі [9].

Для дослідження властивостей акрил-уретанових композицій, методом поливу з наступним висушуванням і кондиціонуванням отримали плівки товщиною $0,2 \pm 0,05$ мм за різного співвідношення сухого залишку акрилової (ПА) і поліуретанової (ПУ) дисперсії. Більш детально процедура отримання вільних плівок описана в роботі [10].

Визначення механічних властивостей полімерних плівок, ступеню набухання плівок у воді і органічних розчинниках проводили за методиками, наведеними в роботі [10]. Зокрема, визначали модуль еластичності, максимальну міцність на розрив та відносне видовження при розтягуванні для акрил-уретанових плівок, а також їх здатності до набухання в етиловому спирті, бутилацетаті, чотирьоххлористому вуглеці. Отримані дані наведені в табл. 1 і проілюстровані на рис. 1–4.

З аналізу результатів механічних випробувань (рис. 1) полімерних акрил-уретанових плівок можна зробити висновок про те, збільшення вмісту поліуретанів від 1 до 4 масових частин супроводжується підвищенням межі міцності плівок при розтягуванні та їх відносного видовження. Можливо таке підвищення межі міцності акрил-уретанових систем пов'язане з утворенням додаткових міжмолекулярних зв'язків, що супроводжується зниженням рухливості молекулярних ланцюгів.

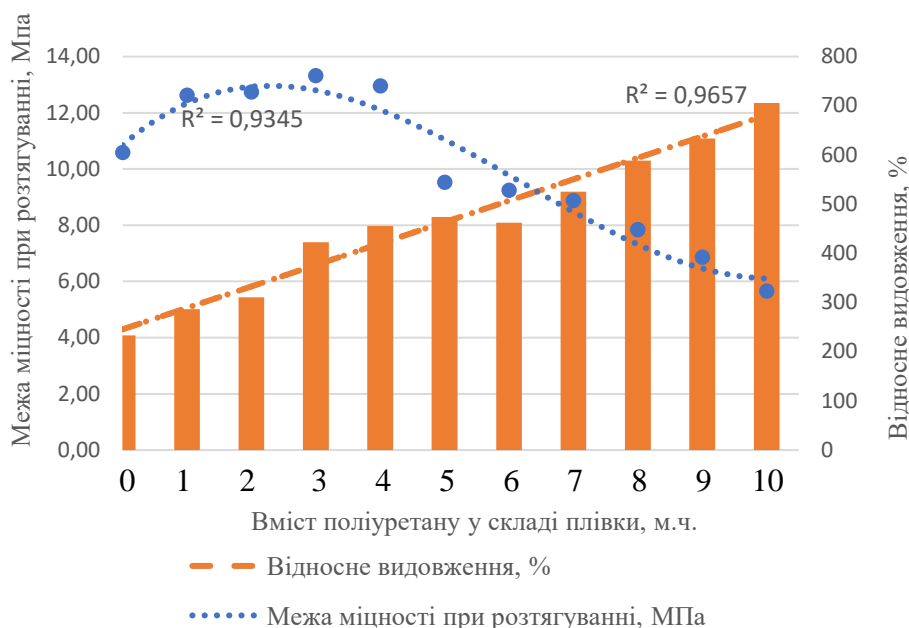


Рис. 1. Результати визначення механічних характеристик плівок за різного вмісту поліуретанів у складі плівки

Можливість сильної міжмолекулярної взаємодії підтверджується підвищенням стійкості акрил-уретанових композицій до дії етилового спирту. Результати визначення ступеню набухання плівок у органічних розчинниках і воді наведені в табл. 1.

Вміст поліуретанів в акрил-уретанових плівках впливає на їх поведінку в розчині етилового спирту. Причин такої поведінки може бути декілька. Загальна структура акрил-уретанових полімерів на відміну від поліакрилатів більш гідрофобна завдяки наявності «жорстких» сегментів поліолів/ізоціанатів на протипагу «м'яким» акриловим сегментам. Крім того, акрилові полімери (поліакрилати) мають естерні групи ($-\text{COOR}$), які добре взаємодіють зі спиртами. До того ж уретанові групи здатні утворювати водневі зв'язки між собою ($-\text{NH}\cdots\text{O}=\text{C}-$), частково з іншими полярними групами, що дає більш щільну упаковку макромолекул. Відповідно етанолу складніше «розірвати» такі взаємодії і проникнути в полімер.

Акрилові плівки демонструють повну розчинність в етиловому спирті. За вмісту поліуретанів в плівках 1–2 масових частин (м.ч.) також спостерігається повна розчинність плівок в етиловому спирті. За вмісту поліуретанів 3–5 м.ч. спостерігається набухання акрил-уретанових плівок в етиловому спирті, подальше підвищення вмісту поліуретанів в акрилуретанових плівках призводить до їх поступового розчинення. Тобто за вмісту поліуретанів 3–5 м.ч. в структурі плівки міститься вже значна кількість уретанових груп, що призводить до полярної взаємодії з етанолом уретанових груп ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$) через водневі зв'язки, але структура залишається що достатньо зшитою, щоб зберегти цілісність плівки.

Таблиця 1

Результати визначення ступеню набухання плівок у органічних розчинниках і воді

Склад полімерної плівки ПА/ПУ, м.ч.	Ступінь набухання плівок в органічних розчинниках, %			Ступінь набухання плівок у воді, %
	Етиловий спирт	Бутилацетат	Чотирьоххлористий вуглець	
10/0	Розчинилась	Розчинилась	Розчинилась	61,73
9/1	Розчинилась	Розчинилась	Розчинилась	41,19
8/2	Розчинилась	Розчинилась	Розчинилась	37,81
7/3	65,80	Розчинилась	Розчинилась	33,64
6/4	91,34	Розчинилась	Розчинилась	25,95
5/5	180,10	Розчинилась	Розчинилась	20,83
4/6	113,78	293,30	461,41	17,12
3/7	90,88	233,66	382,53	6,18
2/8	65,29	242,15	189,35	1,82
1/9	12,11	127,70	66,35	1,55
0/10	6,61	23,84	14,41	1,33

Як видно з наведених на рис. 2 даних, по мірі збільшення вмісту поліуретанів в акрил-уретанових композиціях, спостерігається поступове зменшення ступеня набухання у воді. Зниження набухання у воді ймовірно зумовлене тим, що акрил-уретанові плівки мають щільну зшиту структуру, є більш гідрофобними, мають сильні внутрішні взаємодії, і відповідно нижчу проникність для води. По мірі збільшення вмісту поліуретанів в акрил-уретанових плівках відбувається зменшення кількості гідрофільних груп, порівняно з чистими акриловими полімерними системами: менше вільних карбоксильних ($-\text{COOH}$) і гідроксильних ($-\text{OH}$) груп, тобто менше функціональних груп, які можуть взаємодіяти з водою.

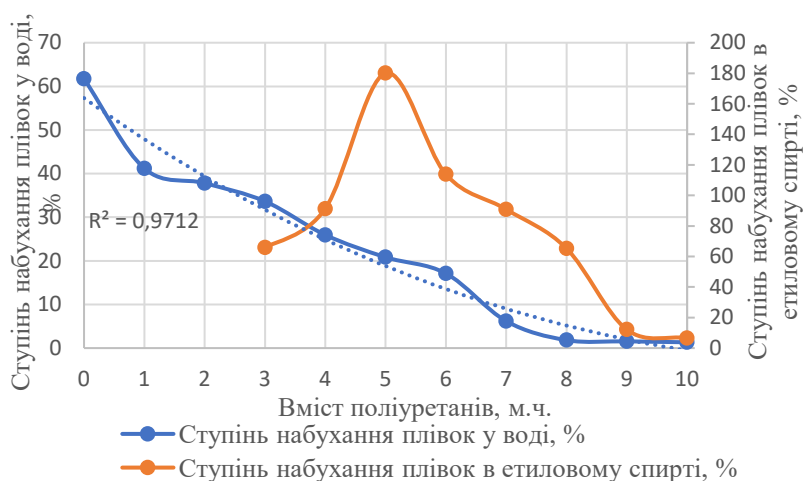


Рис. 2. Результати визначення ступеня набухання акрил-уретанових плівок в етиловому спирті та у воді

Ймовірно збільшення вмісту поліуретану в акрил-уретанових плівках підвищує їхню спорідненість до полярного розчинника (етанолу), що сприяє переходу від обмеженого набухання до повного розчинення внаслідок руйнування міжланцюгових взаємодій і зниження ефективної щільності зшивання.

Перехід від набухання до розчинення полімерних систем у розчинниках пояснюється термодинамікою змішування згідно з теорією Флорі–Хаггінса та Флорі–Ренера, де вирішальну роль відіграє співвідношення взаємодій полімер–полімер і полімер–розчинник, а також густина зшивання полімерної сітки [11].

По мірі збільшення вмісту поліуретану в композиції, полімерна структура стає більш «гнучкою», плівка може сильніше розтягуватись, що супроводжується зростанням відносного видовження, але при цьому гірше чинить опір деформації (модуль еластичності падає).

Протилежні залежності для модуля еластичності і відносного видовження (рис. 3) з рухливістю макромолекул полімерів. Якщо полімерні ланцюги щільно упаковані, вони майже не рухаються, полімерний матеріал жорсткий і характеризується високим модулем еластичності і низьким видовженням. Це спостерігається за відсутності поліуретану в системі, або за низького його вмісту (1-2 м.ч.). Якщо полімерні ланцюги більш рухливі (менше зв'язків між ними) вони здатні легко переміщуватися один відносно одного, що супроводжується зростанням відносного видовження і зниженням модулю еластичності, що притаманне для композицій з високим вмістом поліуретанів. Одною з причин такої поведінки може бути зменшення ступеня кристалічності акрил-уретанових полімерних систем по мірі збільшення вмісту поліуретанів.

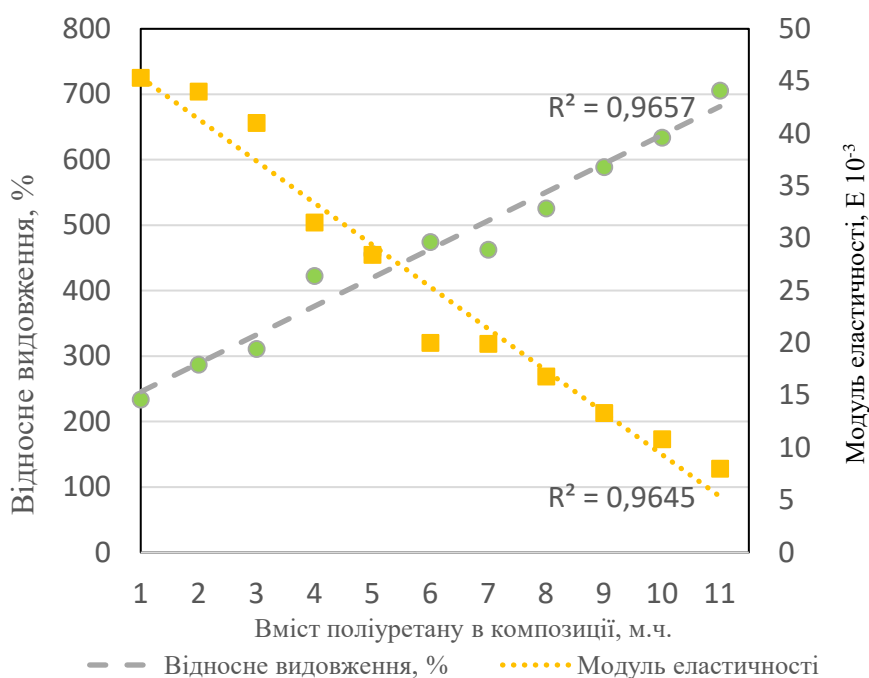


Рис. 3. Характеристика еластичних властивостей плівок за різного вмісту поліуретану

На рис. 4 наведена крива, яка характеризує поведінку полімерних матеріалів під впливом напружень та деформацій. Як видно з наведених даних, подібну форму має крива, наведена автором [12, с. 83]. Загалом досліджувана акрил-уретанова система проявляє помітні в'язко-пружні властивості. Крива показує характерну поведінку полімерів, які мають великий запас міцності та значну пластичність/еластичність. Руйнування відбувається більш різке, ніж у поліуретанів, але менш крихке, ніж у звичайного акрилу. Нелінійний характер нашої кривої пов'язаний з розкручуванням полімерних ланцюгів і подальшим рухом окремих сегментів по мірі розтягування. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.9203$ для апроксимуючої кривої (лінії тренду) вказує на високу достовірність отриманих даних, які описують залежність напруження–деформація.

Комбінація жорстких акрилових фрагментів і м'яких уретанових для акрил-уретанових систем дозволяє досягти балансу між жорсткістю та еластичністю. Присутність 3–4 м.ч. поліуретанів в акрил-поліуретановій композиції дозволяє досягти підвищення межі міцності плівки до 12,9–13,3 МПа при одночасному збільшенні її еластичності до 420–450%, на відміну від плівки з акрилової дисперсії (межа міцності 10,5 МПа і відносне видовження 233,3%).

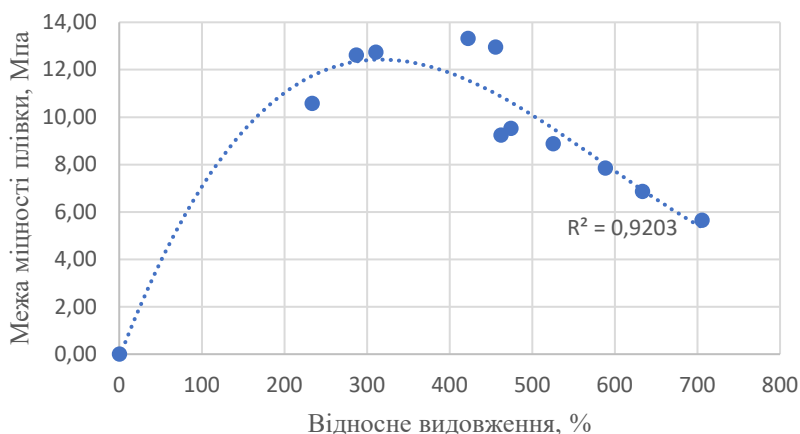


Рис. 4. Поведінка акрил-уретанових полімерних матеріалів під впливом напружень та деформацій

Таким чином, змінюючи вміст поліуретанів в акрил-уретанових полімерних дисперсіях можливо забезпечити отримання текстильних покриттів спеціального призначення з необхідними фізико-механічними характеристиками. Це дає змогу створювати конкурентоспроможні тканини з покращеними стабільними властивостями, зокрема технічного застосування. Подальші дослідження будуть направлені на відпрацювання параметрів текстильного оздоблення акрил-уретановими полімерами.

Висновки. За результатами дослідження фізико-механічних властивостей акрил-уретанових плівок зроблено висновок про те, що збільшення вмісту поліуретанів від 1 до 4 м.ч супроводжується підвищенням межі міцності плівок при розтягуванні та їх відносного видовження. Можливо таке підвищення межі міцності акрил-уретанових систем пов'язане з утворенням додаткових міжмолекулярних зв'язків, що супроводжується зниженням рухливості молекулярних ланцюгів.

Можливість сильної міжмолекулярної взаємодії підтверджується підвищенням стійкості акрил-уретанових композицій до дії етилового спирту. За вмісту поліуретанів 3-5 м.ч спостерігається набухання акрил-уретанових плівок в етиловому спирті, подальше підвищення вмісту поліуретанів в акрил-уретанових плівках призводить до їх поступового розчинення. Ймовірно збільшення вмісту поліуретану в акрил-уретанових плівках в досліджуваних межах підвищує їхню спорідненість до полярного розчинника (етанолу), що сприяє переходу від обмеженого набухання до повного розчинення внаслідок руйнування міжланцюгових взаємодій і зниження ефективної щільності зшивання.

Зроблено висновок про помітні в'язко-пружні властивості досліджуваної акрил-уретанової системи, що вказує на характерну поведінку полімерів, які мають великий запас міцності та значну пластичність/еластичність. Комбінація жорстких акрилових фрагментів і м'яких уретанових для акрил-уретанових систем дозволяє досягти балансу між жорсткістю та еластичністю. Присутність 3–4 м.ч поліуретанів (30-40% за вмістом сухого залишку) в акрил-поліуретановій композиції дозволяє досягти підвищення межі міцності плівки до 12,9–13,3 МПа при одночасному збільшенні її еластичності до 420–450%.

Таким чином, змінюючи вміст поліуретанів в акрил-уретанових полімерних дисперсіях можливо забезпечити отримання текстильних покриттів спеціального призначення з необхідними фізико-механічними характеристиками.

Подяка. Автори статті дякують доценту кафедри біотехнології шкіри та хутра Охмат Олені Анатоліївні за допомогу у проведенні механічних випробувань зразків акрил-уретанових плівок.

References

Література

- Goddard, M., & Hotchkiss, J. H. (2007). Polymer surface modification for the attachment of bioactive compounds. *Progress in Polymer Science*, 32(8–7), 698–725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.04.002>.
- Zhu, Y., Burgaz, E., Gido, S. P., Staudinger, U., Weidisch, R., Uhrig, D., & Mays, J. W. (2006). Morphology and tensile properties of multigraft copolymers with regularly spaced tri-, tetra-, and hexafunctional junction points. *Macromolecules*, 39(13), 4428–4436. DOI: <https://doi.org/10.1021/ma060067s>.
- Kolodiy, A., & Plavan, V. (2025). Vodonepronykni dykhyayuchi polimerni pokryttya dlya tekstylyu: yikh vlastyivosti ta osoblyvosti otrymannya [Waterproof breathable polymer coatings for textiles: their properties and production features]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 359(6.1), 301–308. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-41> [in Ukrainian].
- Chattopadhyay, D. K., & Raju, K. V. S. N. (2007). Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications. *Progress in Polymer Science*, 32(3), 352–418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.05.003>.
- Wu, J., Ge, Q., & Mather, P. T. (2010). PEG-POSS multiblock polyurethanes: Synthesis, characterization, and hydrogel formation. *Macromolecules*, 43(18), 7637–7649. DOI: <https://doi.org/10.1021/ma101336c>.
- Jian, Z., Yong, H., Ming, X., & Jun, N. (2009). Preparation and properties of dual-cure polyurethane acrylate. *Progress in Organic Coatings*, 66 (1), 35–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.05.001>.
- Lu, S.-H., Liang, G.-Z., Wang, J.-L., & Ren, H.-J. (2006). Synthesis and performance characteristics of a water-based polyacrylate microemulsion for UHMWPE fiber adhesive coating. *Journal of Applied Polymer Science*, 99(6), 3195–3202. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.22171>.
- Slepchuk, I., Semeshko, O., Asauliyuk, T., & Saribyeikova, Y. G. (2020). Investigation of

physicochemical properties of styrene-acrylic and urethane polymers used in finishing of textile materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy Khimiya Khimicheskaya Tekhnologiya*, 63(3), 88–93. DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206303.6091>.

9. Plavan, V., Kolodii, A., Okhmat, O., Boichenko, A., & Latshev, D. (2024). Porivnialna otsinka polimernykh dyspersii dlia funktsionalizatsii poverkhni voloknystykh materialiv [Comparative evaluation of polymer dispersions for surface functionalization of fibrous materials]. *Tekhnologii ta inzhynirynh*, 4(21), 102–110. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.4.10> [in Ukrainian].

10. Plavan, V., Kolodii, A., & Okhmat, O. (2025). Analiz plivkoutvoriuvanoi zdatnosti polimernykh dyspersii dlia stvorennia hibrydnykh pokryttiv [Analysis of film-forming ability of polymer dispersions for creating hybrid coatings]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 351(3.1), 428–433. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-52> [in Ukrainian].

11. Fujii, Y. (2008). Equilibrium swelling of poly (p-phenylene sulfide) in Toluene–Ethanol Mixtures. *Polymer Journal*, 40, 725–728. DOI: <https://doi.org/10.1295/polymj.PJ2008002>.

12. Majid, R. A. (2007). Polyurethane–polyacrylic hybrid dispersions. Doctoral dissertation, Loughborough University. URL: <https://hdl.handle.net/2134/35337>.

physicochemical properties of styrene-acrylic and urethane polymers used in finishing of textile materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy khimiya khimicheskaya tekhnologiya*. 2020. No. 63 (3). P. 88–93. DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206303.6091>.

9. Плаван В., Колодій А., Охмат О., Бойченко А., Латішев Д. Порівняльна оцінка полімерних дисперсій для функціоналізації поверхні волокнистих матеріалів. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 4(21). С. 102–110. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.4.10>.

10. Плаван В., Колодій А., Охмат О. Аналіз плівкоутворювальної здатності полімерних дисперсій для створення гібридних покриттів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. No. 351 (3.1). С. 428–433. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-52>.

11. Fujii Y. Equilibrium Swelling of Poly (p-phenylene sulfide) in Toluene-Ethanol Mixtures. *Polymer Journal*. 2008. Vol. 40. P. 725–728. DOI: <https://doi.org/10.1295/polymj.PJ2008002>.

12. Majid R. A. Polyurethane–polyacrylic hybrid dispersions. Doctoral dissertation, Loughborough University, 2007. URL: <https://hdl.handle.net/2134/35337>.

KOLODII ARTEM

PhD student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-6771-6037>
E-mail: artem.kolodii@w-chem.com.ua

PLAVAN VIKTORIIA

Doctor of Sci., Professor, Head of Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>
Scopus Author ID: 6603130130
E-mail: plavan.vp@knuud.edu.ua

LIASHOK IRINA

PhD, Associate Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9171-1075>
Scopus Author ID: 6508201621
E-mail: lyashok.io@knuud.edu.ua

Artem KOLODII, Viktoriia PLAVAN, Irina LIASHOK

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

REGULATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES FOR THE ACRYLIC-URETHANE POLYMER MATERIALS

Objective. The aim of this work is to regulate the physical and mechanical properties of acrylic-urethane polymer materials by determining the rational ratio of components for the finishing composition.

Methodology. The study used polymer materials of various types: CRILAT 4815 (Vinavil, Italy), Impranil DLP-R (Covestro, Germany). Polymer films with a thickness of 0.2 ± 0.05 mm were obtained by casting followed by drying and conditioning, with different ratios of dry residue of polyacrylic (PA) and polyurethane (PU) dispersions to investigate the properties of acrylic-urethane compositions. The elastic modulus, tensile strength, and relative elongation at break of the acrylic-urethane films were determined, as well as their swelling behavior in ethyl alcohol, butyl acetate, and carbon tetrachloride.

Findings. The mechanical behavior of acrylic-urethane polymer films was analyzed in comparison with that of pure polyurethane and polyacrylate polymer films. It was established that the presence of 30–40% polyurethane (by dry residue content) in the acrylic-urethane composition makes it possible to increase the tensile strength of the film to 12.9–13.3 MPa while simultaneously increasing its elasticity to 420–450%, compared to a film made from pure acrylic dispersion (tensile strength 10.5 MPa and elongation 233.3%). This increase in tensile strength of acrylic-urethane systems is likely associated with the formation of additional intermolecular bonds, accompanied by reduced mobility of molecular chains. The possibility of strong intermolecular interaction is confirmed by the increased resistance of acrylic-urethane films to the action of ethyl alcohol.

Originality. The results of the study indicate that it is possible to obtain textile coatings with desired physico-mechanical characteristics by varying the polyurethane content in acrylic-urethane polymer films.

Practical value. The use of water-dispersed systems based on acrylic and urethane polymers is proposed for modifying textile surfaces in order to impart new functional properties to products. This enables the creation of competitive fabrics with improved and stable properties, particularly for technical applications.

Keywords: polymer dispersions; polymer coatings; polyacrylate; polyurethane; acrylic-urethane dispersions; physico-mechanical properties.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.1>

Received: 26.02.2026
Revised: 18.03.2026
Accepted: 09.04.2026

УДК 004.8:004.65:
004.932

Антоніна ВОЛІВАЧ, Ростислав ВЛАСОВ
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ОБРОБКИ ТА ФАКТОРИЗАЦІЇ ДАНИХ У ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Мета. Проведення порівняльного аналізу існуючих підходів до обробки геопросторових даних у геоінформаційних системах та визначення можливостей застосування алгебраїчної факторизації для аналізу багатовимірних екологічних даних.

Методика. Виконано систематизацію та порівняльний аналіз підходів до обробки геопросторових даних, зокрема методів розподілених обчислень, геометричного моделювання, матричної факторизації, багатовимірного статистичного аналізу, просторово-часових графових нейронних мереж і підходів до інтеграції даних з різних джерел. Оцінювання здійснювалось за критеріями: тип даних, наявність просторової складової, врахування часових залежностей, застосування алгебраїчної факторизації, інтеграція з ГІС, масштабованість, інтерпретованість результатів, обчислювальна складність і придатність до екологічних задач. Розглянуто чотири групи підходів: інфраструктурні та теоретичні методи, методи алгебраїчної факторизації, статистичні методи та інтелектуальні алгоритми, що дозволило оцінити їх ефективність для обробки просторових, просторово-часових і багатовимірних геопросторових даних.

Результати. Встановлено, що нейромережеві моделі забезпечують ефективне врахування складних просторово-часових залежностей, однак характеризуються високою обчислювальною складністю та низькою інтерпретованістю. Показано, що існуючі підходи не забезпечують універсального поєднання методів алгебраїчної факторизації, просторово-часового моделювання та специфіки екологічних геопросторових даних.

Наукова новизна. Систематизовано сучасні підходи до обробки геопросторових даних з позиції застосування алгебраїчної факторизації та визначено невирішені аспекти її інтеграції в екологічні геоінформаційні системи. Обґрунтовано доцільність розробки методів факторизації для багатовимірних даних з урахуванням просторово-часових залежностей.

Практична значимість. Результати можуть бути використані для створення нових методів алгебраїчної факторизації в екологічних геоінформаційних системах, зокрема моніторингу довкілля, підтримки прийняття рішень та аналізу багатовимірних геопросторових даних.

Ключові слова: алгебраїчна факторизація даних; геоінформаційні системи; просторово-часові дані; системний аналіз; матрична факторизація; порівняльний аналіз.

Вступ. Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) широко застосовуються для аналізу просторових даних у різних предметних областях, зокрема екологічному моніторингу, транспортних дослідженнях, управлінні землекористуванням та рекомендаційних сервісах. Постійне збільшення обсягів геопросторових даних, їх багатовимірність і неоднорідність зумовлюють необхідність застосування ефективних підходів до їх обробки та аналізу [1]. Традиційні статистичні методи не завжди забезпечують необхідну масштабованість і точність при роботі з великими масивами геопросторової інформації. Це зумовлює потребу у використанні сучасних підходів, зокрема методів алгебраїчної факторизації, які дозволяють зменшувати розмірність даних та виділяти їх латентну структуру [2–3]. Розв'язання цієї задачі має важливе практичне значення для побудови екологічних ГІС, систем підтримки прийняття рішень та аналізу багатовимірних просторово-часових даних.

Додатково зростає потреба у комплексному аналізі екологічних геопросторових даних, що надходять із різних джерел, включаючи сенсорні мережі, супутникові спостереження та краудсорсингову інформацію. Такі дані характеризуються високою розмірністю, наявністю пропусків, шумом і складними просторово-часовими залежностями. Використання класичних

методів аналізу часто не забезпечує ефективної інтеграції гетерогенних даних у єдину модель. У цьому контексті методи алгебраїчної факторизації забезпечують ефективне зменшення розмірності, виділення латентних факторів та підвищення інтерпретованості результатів. Їх інтеграція з геоінформаційними системами створює нові передумови для розвитку підходів до аналізу екологічних даних. Таким чином, дослідження підходів до обробки даних із використанням алгебраїчної факторизації в контексті геоінформаційних систем є актуальним і доцільним.

Аналіз попередніх досліджень. Однією з ключових проблем геоінформаційних систем є вибір ефективних підходів до обробки та факторизації геопросторових даних, що характеризуються високою розмірністю, гетерогенністю та складними просторово-часовими залежностями. Існуючі методи суттєво відрізняються за рівнем масштабованості, інтерпретованості та здатністю враховувати просторово-часові фактори, що ускладнює їх універсальне застосування та зумовлює необхідність аналізу підходів до обробки геопросторових даних і застосування методів факторизації [1–11].

Аналіз сучасних досліджень показав, що основні напрями обробки геопросторових даних охоплюють широкий спектр підходів від розподілених обчислювальних систем до моделей матричної факторизації з урахуванням просторово-часових залежностей. Зокрема, у роботі [1] запропоновано підхід до обробки великих геопросторових даних на основі розподілених обчислювальних систем і паралельних алгоритмів. Такий підхід забезпечує високу масштабованість, однак не охоплює методи аналітичного моделювання.

У роботі [2] сформульовано теоретичні основи геометричного представлення просторових об'єктів у ГІС, що створює математичне підґрунтя для подальших алгоритмічних досліджень, проте не містить прикладних методів аналізу даних.

У роботах [3–6] розглянуто підходи на основі матричної факторизації для задач аналізу геопросторових даних. Зокрема, модель GeoMF [3] поєднує матричну факторизацію з географічним моделюванням для задач рекомендації точок інтересу, що дозволяє враховувати просторову близькість об'єктів. GeoMF розширено представлено в [4] шляхом інтеграції механізму ранжування, що підвищує якість рекомендацій, однак не враховує часову динаміку. У роботі [5] запропоновано модель LGLMF, яка використовує логістичну матричну факторизацію з урахуванням локальних географічних особливостей, що підвищує точність при роботі з розрідженими даними. Подальший розвиток представлено у [6], де поєднано географічне та часове моделювання на основі матричної факторизації, що дозволяє враховувати просторово-часові залежності, однак модель залишається орієнтованою переважно на задачі рекомендаційних систем.

У роботах [7, 8] досліджено екологічні аспекти аналізу геопросторових даних. Так у [7] запропоновано поєднання індексів забруднення, геоінформаційних систем і багатовимірних статистичних методів для аналізу ґрунтів, що забезпечує інтерпретованість результатів, однак обмежує можливості роботи з великими багатовимірними наборами даних. У роботі [8] представлено застосування часткового канонічного кореляційного аналізу для дослідження просторового розподілу біологічних видів, що дозволяє враховувати взаємозв'язки між екологічними та просторовими факторами, проте не забезпечує виявлення прихованих структур даних.

Моделювання просторово-часових процесів представлено у роботі [9], де застосовано багатовимірну двонаправлену просторово-часову графову нейронну мережу для відновлення транспортних потоків. Такий підхід забезпечує високу точність відтворення складних залежностей, однак характеризується значною обчислювальною складністю та обмеженою інтерпретованістю результатів, що є типовим для класу графових нейронних мереж.

Питання інтеграції різних джерел геопросторових даних розглянуто у працях [10–11]. У роботі [10] узагальнено підходи до використання crowdsourced-даних у задачах

картографування землекористування, що підкреслює потенціал інтеграції даних з різних джерел, однак не містить формалізованих алгоритмічних рішень. У роботі [11] представлено систему візуалізації та рекомендацій у туристичних геоінформаційних системах, яка інтегрує дані з різних джерел та інтелектуальні алгоритми, проте не використовує універсальні підходи алгебраїчної факторизації, що обмежує узагальнення отриманих результатів.

Незважаючи на значну кількість досліджень, наведені підходи переважно орієнтовані на рекомендаційні системи, статистичні методи для екологічних задач або складні нейромережеві моделі. При цьому недостатньо дослідженими залишаються питання інтеграції методів алгебраїчної факторизації з геоінформаційними системами для аналізу багатовимірних екологічних просторово-часових даних.

Постановка завдання. Сучасні геоінформаційні системи оперують значними обсягами геопросторових даних, що характеризуються високою розмірністю, гетерогенністю та наявністю складних просторово-часових залежностей. Це зумовлює необхідність застосування ефективних методів їх обробки та аналізу, зокрема підходів, що базуються на статистичних моделях, алгоритмах машинного навчання та методах алгебраїчної факторизації.

Водночас існуючі підходи суттєво відрізняються за рівнем масштабованості, інтерпретованістю результатів та здатністю враховувати просторово-часову структуру даних. Методи алгебраїчної факторизації демонструють потенціал для зменшення розмірності даних і виявлення прихованих залежностей, проте їх застосування у геоінформаційних системах залишається обмеженим і переважно орієнтованим на окремі прикладні задачі. Статистичні методи забезпечують високу інтерпретованість, однак не завжди ефективні при роботі з великими багатовимірними наборами даних. Нейромережеві підходи дозволяють моделювати складні залежності, але характеризуються значною обчислювальною складністю.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення системного порівняльного аналізу існуючих підходів до обробки та алгебраїчної факторизації геопросторових даних у геоінформаційних системах з метою визначення їх особливостей, переваг і недоліків, а також оцінювання їх придатності для ефективного аналізу багатовимірних даних.

Результати досліджень. У ході аналізу визначено систему критеріїв до оброблення геопросторових даних у геоінформаційних системах. До основних критеріїв віднесено тип даних, наявність просторової складової, врахування часових залежностей, використання алгебраїчної факторизації, можливість інтеграції з геоінформаційними системами, масштабованість, інтерпретованість результатів, обчислювальну складність та придатність для аналізу екологічних даних [1–11].

Одним із ключових критеріїв є тип даних, оскільки різні методи орієнтовані на обробку різних структур інформації. Частина підходів працює з просторовими даними, інші – просторово-часовими або багатовимірними наборами даних. Важливим аспектом є здатність методів ефективно обробляти великі обсяги інформації, що є характерним для сучасних геоінформаційних систем.

Наступним критерієм є наявність просторової складової. Для геоінформаційних систем це визначальний чинник, оскільки більшість задач пов'язана з аналізом територіального розподілу явищ. При цьому додатково оцінюється можливість врахування часових залежностей, що є важливим для дослідження динаміки змін екологічних та інших просторово розподілених процесів.

Не менш важливим критерієм є рівень інтеграції відповідних підходів із геоінформаційними системами, що визначає можливість їх практичного застосування в реальних інформаційно-аналітичних задачах. Окремим критерієм виступає використання методів алгебраїчної факторизації, які забезпечують зменшення розмірності даних, виявлення прихованих структур та підвищення інтерпретованості результатів аналізу.

Також суттєве значення мають такі характеристики, як масштабованість методів, що відображає їх здатність ефективно обробляти великі обсяги даних, та інтерпретованість результатів, яка визначає зрозумілість отриманих моделей для подальшого аналізу, а також обчислювальна складність алгоритмів, що впливає на можливість їх практичної реалізації у ГІС. Додатково враховується придатність методів для аналізу екологічних даних, які характеризуються високою розмірністю, шумом і неоднорідністю.

Встановлено, що для аналізу геопросторових даних у геоінформаційних системах застосовується широкий спектр методів від класичних статистичних моделей до сучасних алгоритмів машинного навчання та підходів алгебраїчної факторизації. Аналіз наукових досліджень показав різноманітність підходів до обробки просторових, просторово-часових та багатовимірних даних. Результати порівняльного аналізу підходів до обробки та аналізу геопросторових даних [1, 2, 10] наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика підходів до обробки та аналізу
геопросторових даних у ГІС**

Критерій порівняння	Розподілені обчислення [1]	Геометричне моделювання [2]	Аналіз crowdsourced GIS даних [10]
Об'єкт дослідження	Великомасштабні географічні дані	Геометричні моделі в ГІС	Дані землекористування та покриття територій
Предмет аналізу	Паралельна обробка геоданих	Математичні основи просторового аналізу	Краудсорсингові геопросторові дані
Тип дослідження	Обчислювальні методи обробки геоданих	Теоретичні основи геометрії в ГІС	Аналітичний огляд джерел геоданих
Тип методів	Паралельні алгоритми	Аналітичні математичні методи	Методи обробки великих та гетерогенних даних
Масштаб даних	Великі геопросторові набори даних	Теоретичні моделі	Великі гетерогенні набори даних
Використання ГІС	Обробка геопросторових даних	Теоретичне обґрунтування ГІС	Аналіз та картографування
Просторовий аналіз	Так	Так	Так
Часовий аналіз	Частково	Ні	Частково
Тип даних	Великі географічні набори даних	Геометричні структури	Краудсорсингові геодані
Мета дослідження	Підвищення продуктивності обробки	Формалізація геометрії ГІС	Аналіз сучасних джерел геоданих
Переваги	Висока продуктивність	Теоретична фундаментальність	Актуальність та масштабованість даних
Недоліки	Складність реалізації	Відсутність експериментальних даних	Неоднорідність даних
Придатність для екологічних ГІС	Висока	Висока	Дуже висока
Можливість факторизації даних	Частково	Теоретично можлива	Висока

Аналіз підходу до масштабованої обробки великих геопросторових даних на основі розподілених обчислювальних систем зосереджений на застосуванні паралельних алгоритмів, що забезпечують ефективну обробку значних обсягів інформації. Водночас у межах цього підходу не передбачено використання методів факторизації, оскільки основна увага зосереджена на інфраструктурних аспектах обробки даних [1].

Теоретичні підходи до геометричного моделювання даних у ГІС базуються на формалізації просторових об'єктів у вигляді математичних структур та опису їх геометричних властивостей. Такий підхід забезпечує математичний опис просторових даних і формує основу для подальшого моделювання й аналізу в межах геоінформаційних систем. Водночас основну увагу зосереджено на теоретичному представленні об'єктів без розроблення алгоритмічних процедур обробки та методів факторизації, що обмежує його застосування для задач зменшення розмірності й виявлення прихованих структур у геопросторових даних [2].

Підхід до аналізу краудсорсингових геопросторових даних розглядається у контексті використання інформації, що надходить від користувачів, для задач картографування землекористування. Такий підхід дозволяє підвищити актуальність і деталізацію геопросторової інформації за рахунок залучення великої кількості зовнішніх джерел. Водночас для нього характерні неоднорідність даних, варіативність якості та складність узгодження, що знижує надійність подальшого аналізу. Однак зазначений підхід має переважно оглядовий характер і не містить формалізованих алгоритмічних рішень, зокрема методів алгебраїчної факторизації геопросторових даних [10].

Результати аналізу методів алгебраїчної факторизації геопросторових даних [3–6] наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика методів географічної матричної факторизації для рекомендації POI

Критерій порівняння	GeoMF [3]	Rank-GeoFM [4]	LGLMF [5]	Geo-Temporal MF [6]
Тип моделі	Географічна матрична факторизація	Ранжувальна географічна факторизація	Логістична локальна географічна факторизація	Просторово-часова матрична факторизація
Основна ідея	Спільне моделювання користувача та географічних факторів	Оптимізація ранжування рекомендацій POI	Врахування локальних географічних залежностей	Спільне моделювання просторових і часових факторів
Тип вхідних даних	Взаємодії користувач–POI	Неявний зворотний зв'язок	Неявний зворотний зв'язок	Просторово-часові взаємодії
Функція оптимізації	Мінімізація похибки відновлення	Оптимізація ранжування	Логістична функція втрат	Спільна функція втрат
Особливості моделі	Урахування географічної близькості	Орієнтація на порядок рекомендацій	Локальні регіональні залежності	Поєднання простору та часу
Переваги	Простота реалізації	Покращене ранжування	Врахування локальних особливостей	Найбільш повне моделювання
Недоліки	Відсутність часових факторів	Висока складність оптимізації	Обмеження локальністю	Висока обчислювальна складність
Придатність для ГІС	Висока	Висока	Висока	Дуже висока

Група методів, що базуються на алгебраїчній факторизації, переважно представлена підходами, орієнтованими на рекомендаційні системи на основі геопросторових даних [3–6]. Вони відрізняються способом урахування просторових і часових факторів, а також рівнем складності моделювання.

Метод GeoMF [3] поєднує матричну факторизацію з географічним моделюванням і враховує просторову близькість об'єктів. Його основною перевагою є підвищення точності рекомендацій за рахунок врахування географічного контексту, однак відсутність повноцінного часового компонента обмежує застосування для динамічних процесів.

Підхід Rank-GeoFM [4] розширює базову модель за рахунок механізму ранжування, що дозволяє покращити якість впорядкування рекомендацій. Водночас він характеризується підвищеною складністю оптимізації та не враховує часові залежності.

Методи локальної географічної логістичної матричної факторизації [5, 6] враховують локальні просторові залежності та забезпечують ефективну роботу з розрідженими даними, що є типовим для геоінформаційних систем. У роботі [6] додатково враховано часовий фактор, що дозволяє моделювати просторово-часові процеси. Водночас для обох підходів характерні висока обчислювальна складність та орієнтація на рекомендаційні задачі, що обмежує їх застосування в екологічних геоінформаційних системах.

Результати аналізу статистичних методів обробки геопросторових даних [7–8] наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Порівняльна характеристика підходів до аналізу просторових екологічних даних із використанням ГІС та багатовимірної статистики

Критерій порівняння	Екологічне забруднення ґрунтів [7]	Просторовий аналіз біорізноманіття [8]
Об'єкт дослідження	Вміст важких металів у ґрунтах Північного Китаю	Просторовий розподіл видів птахів
Предмет аналізу	Рівні та джерела забруднення	Просторово-екологічні фактори поширення видів
Тип даних	Геохімічні дані ґрунтів	Біогеографічні дані
Використання ГІС	Картографування та аналіз забруднення	Просторовий аналіз поширення видів
Статистичні методи	Багатовимірна статистика, факторний аналіз	Частковий канонічний кореляційний аналіз
Додаткові методи	Індекси забруднення	Канонічний аналіз відповідностей
Просторовий аналіз	Аналіз розподілу концентрацій	Аналіз просторових залежностей
Мета дослідження	Виявлення джерел та рівнів забруднення	Визначення екологічно-просторових взаємозв'язків
Переваги	Висока інтерпретованість результатів	Детальний аналіз просторової структури
Недоліки	Відсутність часової складової	Обмеженість типів аналізованих факторів
Придатність для екологічних ГІС	Висока	Висока
Можливість факторизації даних	Частково	Частково

У роботах екологічного спрямування переважно застосовуються класичні статистичні методи аналізу просторових даних. Зокрема, у дослідженні [7] використано багатовимірні статистичні методи у поєднанні з геоінформаційними системами для аналізу рівнів і просторового розподілу забруднення ґрунтів. Такий підхід забезпечує високу інтерпретованість результатів та дозволяє ідентифікувати джерела забруднення, однак не враховує часову динаміку процесів.

У роботі [8] застосовано частковий канонічний кореляційний аналіз для дослідження просторово-екологічних взаємозв'язків у біогеографічних даних. Метод дозволяє враховувати залежності між екологічними та просторовими факторами, проте обмежується заданими типами змінних і не забезпечує автоматичного виявлення прихованих структур у великих багатовимірних наборах даних.

Загалом розглянуті статистичні підходи характеризуються достатньо високою інтерпретованістю та придатністю для екологічних задач, однак не використовують методи алгебраїчної факторизації, що обмежує їх ефективність при обробці складних багатовимірних геопросторових даних.

Результати аналізу інтелектуальних методів обробки геопросторових даних, зокрема графових нейронних мереж та рекомендаційних алгоритмів [9, 11] наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика методів аналізу та обробки геопросторових даних на основі інтелектуальних алгоритмів

Критерій порівняння	Просторово-часові графові нейронні мережі [9]	Інтелектуальні рекомендаційні алгоритми з мультиджерельними даними [11]
Об'єкт дослідження	Міський транспортний потік	Туристичні геоінформаційні дані
Предмет аналізу	Відновлення пропущених значень транспортного потоку	Візуалізація та рекомендація туристичних об'єктів
Тип даних	Просторово-часові дані транспортної мережі	Мультиджерельні географічні дані
Використання ГІС	Аналіз транспортної інфраструктури	Візуалізація туристичних ресурсів
Основний метод	Двонаправлена просторово-часова графова нейронна мережа	Інтелектуальні алгоритми рекомендацій
Тип моделі	Spatio-temporal graph neural network	Recommendation system з багатоджерельними даними
Облік просторових залежностей	Так	Так
Облік часових залежностей	Так	Частково
Використання мультиджерельних даних	Частково	Так
Мета дослідження	Заповнення пропущених значень у транспортних даних	Побудова системи рекомендацій для туризму
Переваги	Висока точність прогнозування	Інтеграція різномірних даних
Недоліки	Висока обчислювальна складність	Обмежена формалізація моделі
Придатність для ГІС	Дуже висока	Висока

Розглянуті підходи до аналізу геопросторових даних із використанням методів машинного навчання представлені просторово-часовими графовими нейронними мережами, які дозволяють моделювати складні взаємозв'язки між просторовими та часовими компонентами даних. Зокрема, застосування двонаправленої просторово-часової графової нейронної мережі забезпечує високу точність відновлення транспортних потоків та врахування складних залежностей у даних. Водночас такі моделі характеризуються значною обчислювальною складністю та низькою інтерпретованістю результатів, що обмежує їх практичне застосування у геоінформаційних системах [9].

Підходи до інтеграції геопросторових даних із різних джерел на основі інтелектуальних алгоритмів орієнтовані на поєднання різномірної інформації для підвищення якості аналізу та рекомендацій. Використання таких методів дозволяє об'єднувати просторові дані, однак супроводжується підвищеними вимогами до обчислювальних ресурсів та відсутністю універсальних підходів до алгебраїчної факторизації, що обмежує можливості узагальнення результатів [11].

Проведений аналіз дозволяє виділити основні групи підходів до обробки геопросторових даних у геоінформаційних системах, а саме:

- методи алгебраїчної факторизації [3–6], що переважно застосовуються у рекомендаційних системах;
- статистичні методи аналізу [7, 8], орієнтовані на екологічні дослідження;
- нейромережеві просторово-часові моделі [9, 11], які забезпечують високу точність моделювання складних залежностей;
- теоретичні та інфраструктурні підходи [1, 2, 10], що формують основу обробки геопросторових даних.

Встановлено, що методи алгебраїчної факторизації забезпечують зменшення розмірності даних та виявлення прихованих залежностей, а також характеризуються відносно високою інтерпретованістю результатів. Проте вони, як правило, не повною мірою враховують складні просторово-часові залежності, що обмежує їх застосування для динамічних геопросторових процесів.

Статистичні методи характеризуються високою інтерпретованістю результатів, однак мають обмеження щодо масштабованості та роботи з великими наборами даних. Нейромережеві підходи забезпечують високу точність моделювання складних залежностей, проте характеризуються значною обчислювальною складністю та низькою інтерпретованістю отриманих результатів.

Особливої уваги потребує застосування зазначених підходів у екологічних геоінформаційних системах. Статистичні методи є ефективними для аналізу екологічних показників, однак обмежені при роботі з багатовимірними даними. Натомість методи алгебраїчної факторизації дозволяють формувати компактні представлення даних, що є важливим для задач екологічного моніторингу та аналізу складних систем.

Отже, встановлено, що методи факторизації застосовуються лише в окремих дослідженнях і переважно орієнтовані рекомендаційні системи, тоді як екологічні геоінформаційні системи здебільшого базуються на статистичних підходах. Сучасні методи обробки геопросторових даних характеризуються підвищеною обчислювальною складністю, а універсальні методи алгебраїчної факторизації, адаптовані до аналізу багатовимірних екологічних геопросторових даних, залишаються недостатньо розробленими.

Висновки. Проведений аналіз показав, що розглянуті підходи до обробки геопросторових даних у геоінформаційних системах охоплюють широкий спектр методів від статистичних та інфраструктурних до інтелектуальних моделей машинного навчання. Встановлено, що методи алгебраїчної факторизації застосовуються лише в окремих

дослідженнях і переважно орієнтовані на задачі рекомендаційних систем, тоді як екологічні геоінформаційні системи здебільшого базуються на статистичних підходах.

Водночас більшість методів характеризується підвищеною обчислювальною складністю або недостатньою інтерпретованістю результатів, що обмежує їх практичне використання. Встановлено, що універсальні підходи алгебраїчної факторизації, адаптовані до аналізу багатовимірних просторово-часових екологічних даних.

Отримані результати підтверджують доцільність подальших досліджень, спрямованих на розробку комбінованих методів обробки та факторизації геопросторових даних, що поєднуюватимуть переваги алгебраїчних, статистичних та інтелектуальних підходів і забезпечуватимуть ефективний аналіз у геоінформаційних системах.

References

1. Hawick, K. A., Coddington, P. D., & James H. A. (2003). Distributed frameworks and parallel algorithms for processing large-scale geographic data. *Parallel Computing*, 29(10), 1297–1333.
2. Frank, A. U. (2007). Practical geometry-mathematics for geographic information systems. Script for GIS Theory course at TU Wien. Vienna: TU Wien.
3. Lian, D., Zhao, C., Xie, X., Sun, G., Chen, E., & Rui, Y. (2014). GeoMF: joint geographical modeling and matrix factorization for point-of-interest recommendation. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 831–840). New York: ACM.
4. Li, X., Cong, G., Li, X. L., Pham, T. A. N., & Krishnaswamy, S. (2015). Rank-GeoFM: a ranking based geographical factorization method for point of interest recommendation. *Proceedings of the 38th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval* (pp. 433–442). New York: ACM.
5. Rahmani, H. A., Aliannejadi, M., Ahmadian, S., Baratchi, M., Afsharchi, M., & Crestani, F. (2019). LGLMF: local geographical based logistic matrix factorization model for POI recommendation. *Asia Information Retrieval Symposium* (pp. 66–78). Cham: Springer.
6. Rahmani, H. A., Aliannejadi, M., Baratchi, M., & Crestani, F. (2020). Joint geographical and temporal modeling based on matrix factorization for point-of-interest recommendation. *European Conference on Information Retrieval* (pp. 205–219). Cham: Springer.
7. Huang, K., Luo, X., & Zheng, Z. (2018). Application of a combined approach including contamination indexes, geographic information system and multivariate statistical models in levels, distribution and sources study of metals in

Література

1. Hawick K. A., Coddington P. D., James H. A. Distributed frameworks and parallel algorithms for processing large-scale geographic data. *Parallel Computing*. 2003. Vol. 29, No. 10. P. 1297–1333.
2. Frank A. U. Practical geometry-mathematics for geographic information systems. Script for GIS Theory course at TU Wien. Vienna: TU Wien, 2007.
3. Lian D., Zhao C., Xie X., Sun G., Chen E., Rui Y. GeoMF: joint geographical modeling and matrix factorization for point-of-interest recommendation. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York: ACM, 2014. P. 831–840.
4. Li X., Cong G., Li X. L., Pham T. A. N., Krishnaswamy S. Rank-GeoFM: a ranking based geographical factorization method for point of interest recommendation. *Proceedings of the 38th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. New York: ACM, 2015. P. 433–442.
5. Rahmani H. A., Aliannejadi M., Ahmadian S., Baratchi M., Afsharchi M., Crestani F. LGLMF: local geographical based logistic matrix factorization model for POI recommendation. *Asia Information Retrieval Symposium*. Cham: Springer, 2019. P. 66–78.
6. Rahmani H. A., Aliannejadi M., Baratchi M., Crestani F. Joint geographical and temporal modeling based on matrix factorization for point-of-interest recommendation. *European Conference on Information Retrieval*. Cham: Springer, 2020. P. 205–219.
7. Huang K., Luo X., Zheng Z. Application of a combined approach including contamination indexes, geographic information system and multivariate statistical models in levels, distribution and sources study of metals in soils

- soils in Northern China. *PLoS ONE*, 13(2), Article e0190906.
8. Titeux, N., Dufrêne, M., Jacob, J. P., Paquay, M., & Defourny, P. (2004). Multivariate analysis of a fine-scale breeding bird atlas using a geographical information system and partial canonical correspondence analysis: environmental and spatial effects. *Journal of Biogeography*, 31(11), 1841–1856.
9. Wang, P., Zhang, T., Zheng, Y., & Hu, T. (2022). A multi-view bidirectional spatiotemporal graph network for urban traffic flow imputation. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(6), 1231–1257.
10. Wu, H., Li, Y., Lin, A., Fan, H., Fan, K., Xie, J., & Luo, W. (2024). A review of crowdsourced geographic information for land-use and land-cover mapping: current progress and challenges. *International Journal of Geographical Information Science*, 38(11), 2183–2215.
11. Han, M. (2025). Tourism geographic information visualization and recommendation system integrating multi-source data with intelligent algorithms. *2025 2nd International Conference on Software, Systems and Information Technology (SSITCON)* (pp. 1–5). IEEE.
- in Northern China. *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13, No. 2. Article e0190906.
8. Titeux N., Dufrêne M., Jacob J. P., Paquay M., Defourny P. Multivariate analysis of a fine-scale breeding bird atlas using a geographical information system and partial canonical correspondence analysis: environmental and spatial effects. *Journal of Biogeography*. 2004. Vol. 31, No. 11. P. 1841–1856.
9. Wang P., Zhang T., Zheng Y., Hu T. A multi-view bidirectional spatiotemporal graph network for urban traffic flow imputation. *International Journal of Geographical Information Science*. 2022. Vol. 36, No. 6. P. 1231–1257.
10. Wu H., Li Y., Lin A., Fan H., Fan K., Xie J., Luo W. A review of crowdsourced geographic information for land-use and land-cover mapping: current progress and challenges. *International Journal of Geographical Information Science*. 2024. Vol. 38, No. 11. P. 2183–2215.
11. Han M. Tourism geographic information visualization and recommendation system integrating multi-source data with intelligent algorithms. *2025 2nd International Conference on Software, Systems and Information Technology (SSITCON)*. IEEE, 2025. P. 1–5.

VOLIVACH ANTONINA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Information and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7119-7774>
E-mail: volivach.ap@knuud.com.ua

VLASOV ROSTYSLAV

Graduate Student,
Department of Information and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-1977-5113>
E-mail: dunadan48@gmail.com

Antonina VOLIVACH, Rostyslav VLASOV

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

A STUDY OF APPROACHES TO DATA PROCESSING AND FACTORIZATION IN GEOINFORMATION SYSTEMS

Purpose. To conduct a comparative analysis of existing approaches to geospatial data processing in geographic information systems and to determine the potential for applying algebraic factorization to the analysis of multidimensional environmental data.

Methodology. A systematization and comparative analysis of approaches to geospatial data processing was performed, specifically including methods of distributed computing, geometric modeling, matrix factorization, multidimensional statistical analysis, spatio-temporal graph neural networks, and approaches to integrating data from various sources. The evaluation was based on the following criteria: data type, presence of a spatial component, consideration of temporal dependencies, application of algebraic factorization, integration with GIS, scalability, interpretability of results, computational complexity, and suitability for environmental tasks. Four groups of approaches were considered: infrastructural and theoretical methods, algebraic factorization methods, statistical methods, and intelligent algorithms, which

allowed for an assessment of their effectiveness in processing spatial, spatiotemporal, and multidimensional geospatial data.

Findings. It has been established that neural network models effectively account for complex spatiotemporal dependencies but are characterized by high computational complexity and low interpretability. It is shown that existing approaches do not provide a universal combination of methods of algebraic factorization, spatiotemporal modeling, and the specifics of environmental geospatial data.

Originality. Modern approaches to geospatial data processing have been systematized from the perspective of applying algebraic factorization, and unresolved aspects of its integration into environmental geoinformation systems have been identified. The feasibility of developing factorization methods for multidimensional data that account for spatiotemporal dependencies has been substantiated.

Practical value. The results can be used to create new methods of algebraic factorization in environmental geoinformation systems, in particular for environmental monitoring, decision support, and the analysis of multidimensional geospatial data.

Keywords: algebraic data factorization; geographic information systems; spatiotemporal data; system analysis; matrix factorization; comparative analysis.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.1.6>Received: 21.01.2026
Revised: 17.02.2026
Accepted: 09.04.2026

УДК 004.056:004.8

Ганна ЗАВГОРОДНЯ¹, Валерій ЗАВГОРОДНІЙ¹,
Андрій САВЧЕНКО², Андрій ЛЕМЕШКО³¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна² Заклад вищої освіти «Міжнародний науково-технічний університет імені академіка Юрія Бугая», Київ, Україна³ Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна**МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА ОБРОБКИ
ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ ДАНИХ У СИСТЕМАХ
АДАПТИВНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ КОНТЕНТУ**

Мета. Метою статті є розроблення комплексного підходу до забезпечення безпеки та коректної обробки персоналізованих даних у системах адаптивної генерації контенту. Запропонований підхід базується на формалізації простору персоналізованих даних користувачів, застосуванні методів анонімізації та псевдонімізації, використанні механізмів диференційної приватності (Differential Privacy), федеративного навчання (Federated Learning) та інтеграції сучасних криптографічних і архітектурних засобів захисту.

Методика. Дослідження спирається на системний аналіз архітектур адаптивних систем і багатовимірного простору ознак користувацьких даних. Для оцінки ризику деанонімізації застосовано математичні моделі диференційної приватності, а для захисту розподілених даних – протоколи федеративного навчання з безпечною агрегацією градієнтів. Проведено порівняльний аналіз сучасних методів захисту персональних даних, моделювання загроз та розроблено багаторівневу архітектурну модель безпеки, що враховує принципи Zero Trust, контроль доступу за ролями (RBAC), шифрування та аудит подій.

Результати. Запропоновано формалізовану модель простору персоналізованих даних, яка дозволяє класифікувати рівні чутливості інформації, визначати допустимі перетворення та інтегрувати їх із методами анонімізації. Доведено ефективність ϵ -диференційної приватності для контролю ризику деанонімізації при навчанні моделей. Розроблено узагальнену схему поєднання федеративного навчання та криптографічних протоколів безпечної агрегації, що забезпечує конфіденційність користувацьких даних без втрати точності моделей. Створено багаторівневу архітектурну систему захисту, яка включає шифрування даних, контроль доступу, аудит і моніторинг, забезпечуючи баланс між безпекою, масштабованістю та ефективністю генерації контенту.

Наукова новизна. Полягає у комплексному поєднанні формальної моделі персоналізованих даних з механізмами диференційної приватності та федеративного навчання в межах єдиної архітектурної концепції безпеки, що дозволяє одночасно забезпечити конфіденційність, масштабованість та ефективність обробки даних у системах адаптивної генерації контенту.

Практична значимість. Результати можуть бути застосовані при розробленні освітніх платформ, ігрових систем, рекомендаційних сервісів та інших інтелектуальних систем, що працюють із персоналізованими профілями користувачів, потребують високого рівня безпеки даних та відповідності сучасним стандартам захисту інформації.

Ключові слова: адаптивна генерація контенту; персоналізовані дані; диференційна приватність; федеративне навчання; шифрування; архітектура безпеки.

Вступ. Стрімкий розвиток систем адаптивної генерації контенту зумовлений впровадженням методів штучного інтелекту у цифрові освітні середовища, ігрові платформи, рекомендаційні сервіси та масові онлайн-системи. Алгоритмічні механізми процедурної генерації дозволяють створювати контент у динамічному режимі на основі заданих правил і параметрів середовища [1]. Подальше підвищення ефективності таких систем досягається

шляхом інтеграції алгоритмів машинного навчання, що забезпечують адаптацію складності та структури контенту відповідно до індивідуальних характеристик користувача [2].

Масштабування адаптивних механізмів у багатокористувацьких середовищах потребує побудови розподілених архітектур, здатних обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу [3]. Моделювання поведінки користувача за допомогою нейромережових агентів [4] дозволяє формувати персоналізовані сценарії взаємодії, проте передбачає накопичення детальних поведінкових профілів. Таким чином, ефективність адаптивної генерації безпосередньо залежить від глибини аналізу персоналізованих даних.

Формування персоналізованого профілю передбачає збір множини параметрів: історії дій, часових характеристик активності, індикаторів складності, реакцій на попередній контент, технічних метаданих пристрою. Сукупність цих ознак створює високовимірний простір персоналізованих даних, який потенційно містить чутливу інформацію. Дослідження з інформаційної безпеки вказують, що навіть агреговані або частково знеособлені дані можуть бути використані для повторної ідентифікації користувача за наявності зовнішніх джерел інформації [5].

Одним із формалізованих підходів до мінімізації ризику деанонізації є диференційна приватність, що забезпечує математичну гарантію обмеження впливу окремого запису на результат обробки даних [6]. Подальші дослідження показують, що практичне застосування ϵ -диференційної приватності потребує оптимального вибору параметра приватності з урахуванням компромісу між точністю моделі та рівнем захисту [7]. Особливо актуально це для систем адаптивної генерації, де надмірний шум може знизити якість персоналізації.

Іншим перспективним напрямом є федеративне навчання, що дозволяє здійснювати тренування моделей без централізованого зберігання сирих даних користувачів [8]. Практична реалізація федеративних підходів у масштабних системах продемонструвала їхню ефективність у зменшенні ризику витоку інформації [9]. Додаткове використання протоколів безпечної агрегації параметрів моделей підвищує рівень захисту від внутрішніх атак і несанкціонованого доступу [10].

Паралельно розвиваються архітектурні концепції забезпечення безпеки, зокрема Zero Trust, що передбачає постійну перевірку автентичності суб'єктів доступу незалежно від їхнього розташування в мережі [11]. Дослідження багаторівневих моделей контролю доступу та шифрування даних на різних етапах життєвого циклу інформації підтверджують необхідність комплексного підходу до захисту [12]. Важливим компонентом сучасних архітектур є використання криптографічних протоколів для захищеної передачі та зберігання даних [13].

Окрему увагу приділено проблемі оцінювання ризиків приватності в системах штучного інтелекту. У роботах [14] підкреслюється необхідність формалізації простору даних та визначення рівнів чутливості параметрів профілю. Аналіз сучасних підходів до *privacy-preserving machine learning* [15] демонструє, що ізольоване застосування окремих механізмів не забезпечує достатнього рівня захисту без інтеграції їх у цілісну архітектуру.

Незважаючи на активний розвиток досліджень у галузі адаптивної генерації контенту та сучасних методів захисту даних, відсутній комплексний підхід, який би поєднував формалізацію персоналізованого простору даних, математичні гарантії приватності та архітектурні механізми безпеки в єдиній моделі побудови адаптивних систем. Більшість робіт розглядає алгоритмічні аспекти персоналізації окремо від задач інформаційної безпеки або фокусується на загальних підходах до *privacy-preserving* машинного навчання без урахування специфіки генеративних адаптивних середовищ.

Отже, актуальною науковою задачею є розроблення цілісної моделі забезпечення безпеки персоналізованих даних у системах адаптивної генерації контенту, що враховує як

математичні, так і архітектурні аспекти захисту. Саме вирішенню цієї проблеми присвячене дане дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження та систематизація методів забезпечення безпеки та обробки персоналізованих даних у системах адаптивної генерації контенту, зокрема в контексті сучасних технологій машинного навчання та розподілених архітектур. Основна задача полягає у визначенні ефективних підходів до:

1. Формалізації простору персоналізованих даних – створення уніфікованої структури для зберігання та обробки даних користувачів, що дозволяє подальше застосування алгоритмів машинного навчання та анонімізації без втрати контекстної інформації.

2. Впровадження анонімізації та псевдонімізації – розробка методів приховування ідентифікаційних ознак користувачів, що знижують ризик ре-ідентифікації та забезпечують захист конфіденційних даних.

3. Застосування диференційованої приватності (Differential Privacy) – забезпечення математично обґрунтованого механізму захисту даних під час навчання моделей, що дозволяє уникати витоку інформації про окремих користувачів.

4. Інтеграції методів федеративного навчання (Federated Learning) – навчання моделей на розподілених пристроях користувачів без централізації персональних даних, забезпечуючи одночасно конфіденційність і ефективність генерації контенту.

5. Впровадження архітектурних механізмів багаторівневого захисту – використання криптографії, Zero Trust підходів, RBAC та систем моніторингу для гарантування цілісності, конфіденційності та доступності даних у динамічних і багатокористувацьких системах.

Дана стаття має на меті ліквідувати існуючі «білі плями» у практичному застосуванні цих технологій, включаючи питання масштабованості, ефективності та конфіденційності обробки даних користувачів у системах адаптивної генерації контенту. Крім того, робота спрямована на системне порівняння методів, що дозволяє визначити оптимальні комбінації технік безпеки для конкретних архітектурних сценаріїв та надати науково обґрунтовані рекомендації для розробників та дослідників у цій сфері.

Результати дослідження. Для формалізації простору персоналізованих даних користувачів було запропоновано їх представлення як структурованих векторів ознак, де кожен об'єкт u_i характеризується набором параметрів:

$$u_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, i = 1, 2, \dots, m,$$

де x_j – окремий атрибут користувача, наприклад, демографічна інформація (x_1 – вік, x_2 – стать, x_3 – локація), історія взаємодії з контентом (x_4 – кількість переглядів, x_5 – час перебування на сторінці), поведінкові параметри (x_6 – швидкість взаємодії, x_7 – частота кліків).

Для більш комплексного відображення взаємозв'язків між користувачами та елементами контенту використовувалася графова модель:

$$G = (V, E),$$

де множина вузлів V включає користувачів і контент-об'єкти:

$$V = \{u_1, u_2, \dots, u_m\} \cup \{c_1, c_2, \dots, c_k\},$$

де u_i – вузол, що відповідає користувачу i ; c_j – вузол, що відповідає контент-об'єкту j ; m – загальна кількість користувачів; k – кількість контент-об'єктів.

Множина ребер графу $E \subseteq V \times V$ відображає взаємодію або схожість між вузлами, наприклад: ребро (u_i, c_j) означає, що користувач u_i взаємодіяв з контентом c_j ; ребро (u_i, u_j) може позначати схожість між користувачами за поведінкою; ребро (c_i, c_j) відображає схожість або тематичну близькість контент-об'єктів.

Кожне ребро можна формалізувати як вагове:

$$e_{pq} = \omega_{pq}, \omega_{pq} \in [0,1],$$

де ω_{pq} – коефіцієнт взаємодії або схожості. Наприклад:

$$\omega_{u_i, c_j} = \frac{\text{кількість взаємодій } u_i \text{ з } c_j}{\text{максимальна кількість взаємодій у системі}}$$

Кожен вузол графу u_i або c_j можна описати не лише ідентифікатором, а й вектором ознак:

$$\phi(u_i) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \phi(c_j) = \{y_1, y_2, \dots, y_l\},$$

де y_l – характеристики контенту, наприклад категорія, рейтинг, тривалість. Це дозволяє об'єднати графові та векторні представлення даних для використання глибоких нейронних мереж на графах (Graph Neural Networks) та класичних моделей машинного навчання.

Анонімізація та псевдонімізація. Анонімізація та псевдонімізація є ключовими методами захисту персоналізованих даних у системах адаптивної генерації контенту. Вони дозволяють мінімізувати ризик ре-ідентифікації користувачів, одночасно зберігаючи релевантність даних для навчання моделей машинного навчання. Використовувались наступні методи: k -анонімність та l -diversity.

k -анонімність забезпечує, що кожний запис у наборі даних не відрізняється від щонайменше $k - 1$ інших за вибраними атрибутами (quasi-identifiers). Формально, для набору даних D :

$$\forall u_i \in D, \exists S \in D \text{ таке, що } |S| \geq k \text{ і } \forall u_j \in S, u_i[QI] = u_j[QI],$$

де QI – набір атрибутів, за якими виконується анонімізація.

l -diversity доповнює k -анонімність, гарантуючи, що в кожному кластері k -записів присутні щонайменше l різних значень чутливих атрибутів S :

$$\forall \text{ кластер } C_k, |\{u_i[S]: u_i \in C_k\}| \geq l.$$

Ця стратегія дозволяє додатково знизити ризик інференційних атак на чутливі дані.

Для перевірки ефективності методу було використано набір даних 1000 користувачів із демографічною інформацією та історією взаємодії з контентом. Встановлено параметри: $k = 5, l = 3$. Ризик ре-ідентифікації вимірювався як частка успішних спроб відновити справжні ідентифікатори користувачів. Результати наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Ефективність методу анонімізації щодо зниження ризику ре-ідентифікації користувачів

Метод	Кількість успішних спроб	Ризик (R), %
Без обробки	230	23
k -анонімність та l -diversity	170	17

Отже, застосування k -анонімності та l -diversity значно знижує ймовірність успішної ре-ідентифікації користувачів.

Псевдонімізація дозволяє замінити ідентифікатори користувачів на псевдоніми, зберігаючи можливість відстежувати сесію чи поведінку, без розкриття персональних даних. Формально:

$$p_i = \text{Hash}(id_i || s),$$

де id_i – оригінальний ідентифікатор користувача; s – секретний ключ; p_i – псевдонім.

Для підвищення безпеки дані після псевдонімізації додатково шифрувалися локально за допомогою алгоритму AES-256 перед передачею на сервер. Рівень витоку інформації оцінювався як:

$$L = \frac{\text{кількість успішних відновлень ідентифікатора}}{\text{загальна кількість користувачів}} \cdot 100\%.$$

Результати експериментальної оцінки ефективності псевдонімізації та локального шифрування наведено у таблиці 2, де показано кількість успішних спроб відновлення ідентифікаторів користувачів та відповідний рівень витоку інформації L .

Таблиця 2

Оцінка рівня витоку персональних даних при використанні псевдонімізації та локального шифрування

Метод	Кількість успішних спроб	Рівень витоку (L), %
Без обробки	230	23
Псевдонімізація та AES	32	16

Як видно з таблиці 2, поєднання псевдонімізації та локального шифрування значно знижує рівень витоку персональних даних користувачів.

Застосування диференційної приватності (Differential Privacy). Диференційна приватність (DP) є математично обґрунтованим механізмом захисту персональних даних під час навчання моделей машинного навчання. Основна ідея DP полягає у тому, щоб додавання або видалення одного користувача з набору даних не змінювало значущим чином результат моделі. Формально DP визначається так:

$$Pr[M(D) \in S] \leq e^\epsilon \cdot Pr[M(D') \in S] + \delta,$$

де M – алгоритм навчання моделі; D і D' – два набори даних, що відрізняються даними одного користувача; S – множина можливих виходів алгоритму; ϵ – параметр конфіденційності (privacy budget); δ – допустима ймовірність порушення приватності.

Для реалізації DP у нашому дослідженні застосовувався механізм Gaussian noise injection у градієнти під час навчання нейронних мереж, що генерують адаптивний контент:

$$\tilde{g}_i = g_i + N(0, \sigma^2),$$

де g_i – локальний градієнт для користувача i ; σ^2 – визначає масштаб випадкового шуму для забезпечення (ϵ, σ^2) – DP.

Експерименти проводилися на симульованому наборі даних користувачів (1000 користувачів, 50 атрибутів кожен, включно з демографічними та поведінковими параметрами). Для оцінки впливу DP на точність генерації контенту та рівень витоку інформації використовувалися наступні метрики:

- Accuracy (точність) генерації адаптивного контенту;
- Privacy loss (ϵ) – фактичне порушення конфіденційності;
- Re-identification risk – ймовірність відновлення персональних даних.

Моделі навчалися у трьох варіантах:

- Без DP (контрольний варіант);
- DP з $\epsilon = 1.0$;
- DP з $\epsilon = 0.5$ (сильніший рівень приватності).

Результати експерименту наведено у таблиці 3.

Як видно з таблиці 3, застосування DP дозволяє значно знизити ризик ре-ідентифікації (з 22% до 5–8%), водночас лише незначно зменшуючи точність генерації контенту (на 2–3%).

З рисунку 1 бачимо, що введення шуму за DP значно знижує ризик ре-ідентифікації, при цьому точність адаптивної генерації контенту практично не змінюється.

Таблиця 3

Вплив застосування диференційної приватності на точність
моделей та ризик ре-ідентифікації

Варіант	Accuracy, %	Privacy loss (€)	Re-identification risk, %
Без DP	95	10	22
DP ($\epsilon = 1.0$)	93	1.0	8
DP ($\epsilon = 0.5$)	92	0.5	5

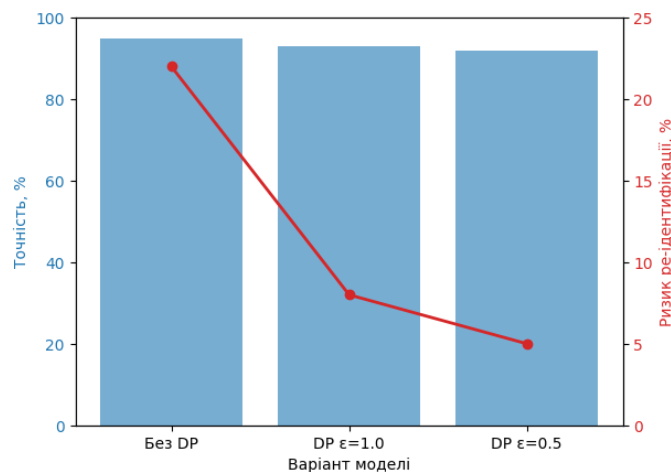


Рис. 1. Вплив диференційної приватності на точність та ризик

Федеративне навчання (Federated Learning). Федеративне навчання (FL) дозволяє тренувати моделі машинного навчання на розподілених пристроях користувачів без централізації їхніх персональних даних. Це забезпечує конфіденційність, зменшуючи ризик витоку даних, водночас зберігаючи високу точність моделі.

Формально глобальні параметри моделі θ_{global} оновлюються як усереднення локальних параметрів:

$$\theta_{global} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i,$$

де θ_i – локальні параметри моделі користувача i , отримані шляхом навчання на його приватних даних; N – кількість клієнтів/пристроїв.

Для підвищення безпеки кожен локальний градієнт шифрувався методом Secure Aggregation, що забезпечило неможливість відновлення окремих локальних оновлень з боку сервера.

Експеримент проводився на симульованому наборі даних 1000 користувачів, розподілених на 10 груп по 100 користувачів. Кожен користувач навчав локальну модель нейронної мережі на своїх даних. Порівнювались три сценарії:

- централізоване навчання без DP – усі дані на сервері;
- федеративне навчання без DP – локальні дані залишаються на пристроях;
- федеративне навчання з DP – кожен локальний градієнт обробляється Gaussian noise injection.

Метрики оцінки:

- Accuracy – точність моделі на тестових даних;
- Data leakage – ймовірність відновлення приватних даних користувача;
- Communication cost – кількість переданих даних між клієнтами та сервером.

Результати експерименту наведено у таблиці 4.

Таблиця 4

Порівняння централізованого та федеративного навчання

Сценарій	Accuracy, %	Data leakage, %	Communication cost, МБ
Централізоване навчання	95	22	500
Федеративне навчання	92	3	120
Федеративне навчання та DP	90	1	120

Як видно з таблиці 4, FL значно знижує ризик витоку даних (з 22% до 3%) порівняно з централізованим навчанням, а поєднання з DP забезпечує максимальний захист (1%), при цьому точність моделі зменшується лише на 5%.

Порівнюючи три сценарії навчання (рис. 2), бачимо досягнення суттєвого приросту конфіденційності за відносно незначної втрати точності.

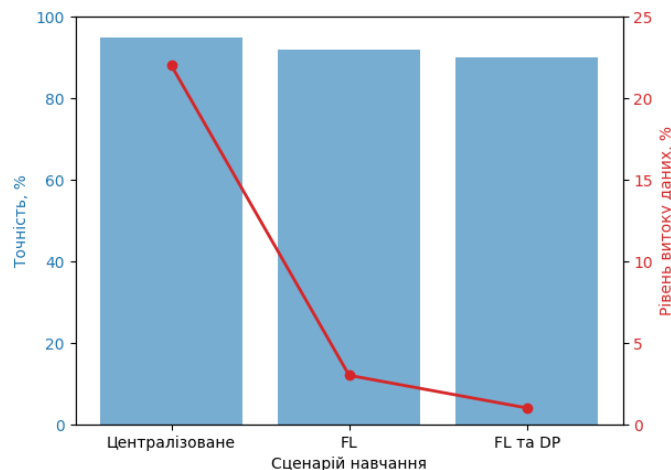


Рис. 2. Вплив федеративного навчання та DP на точність та захист даних

Архітектурні засоби безпеки. Архітектурні засоби безпеки формують системний рівень захисту персоналізованих даних у системах адаптивної генерації контенту. На відміну від окремих алгоритмічних механізмів (анонімізація, DP, FL), архітектурний підхід забезпечує багаторівневий контроль доступу, ізоляцію компонентів та моніторинг безпекових подій.

У дослідженні запропоновано багаторівневу модель захисту, що включає:

- рівень збору даних (Data Acquisition Layer);
- рівень обробки (Processing Layer);
- рівень зберігання (Storage Layer);
- рівень доступу та моніторингу (Access & Monitoring Layer).

Формально архітектуру можна подати як множину компонентів:

$$A = \{L_1, L_2, L_3, L_4\},$$

де кожен рівень L_i реалізує власну функцію безпеки S_i , а загальний рівень захищеності системи визначається як композиція:

$$S_{total} = S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap S_4.$$

Тобто компрометація одного рівня не призводить автоматично до повного порушення конфіденційності.

У межах дослідження було реалізовано модель Role-Based Access Control (RBAC), яка забезпечує централізоване та формалізоване розмежування прав доступу до ресурсів системи адаптивної генерації контенту.

Формально система визначається трьома базовими множинами:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\},$$

де U – множина користувачів системи; u_i – i -й користувач (наприклад, адміністратор, модератор, аналітик, звичайний користувач); n – загальна кількість користувачів.

Множина ролей у системі:

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\},$$

де r_j – j -та роль (наприклад, «Admin», «ContentManager», «DataAnalyst», «User»); m – кількість визначених ролей.

Множина дозволів (permissions):

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\},$$

де p_l – l -й дозвіл (читання даних, запис, модифікація, видалення, запуск моделі, перегляд аналітики тощо); k – загальна кількість дозволів у системі.

Призначення ролей користувачам визначається функцією:

$$f: U \rightarrow 2^R,$$

де 2^R – булеан множини R ; $f(u_i)$ – множина ролей, призначених користувачу u_i . Тобто один користувач може мати кілька ролей одночасно.

Надання дозволів ролям визначається функцією:

$$g: R \rightarrow 2^P,$$

де $g(r_j)$ – множина дозволів, які має роль r_j . Наприклад, роль «Admin» може мати всі дозволи, тоді як «User» – лише доступ до власних даних.

Доступ користувача u_i до ресурсу, що потребує дозволу p_j , дозволено тоді і тільки тоді, коли:

$$Access = (u_i, p_j) = 1 \Leftrightarrow \exists r \in f(u_i): p_j \in g(r),$$

де $Access = (u_i, p_j) = 1$ – означає, що доступ надано; $\exists r \in f(u_i)$ – існує хоча б одна роль, призначена користувачу; $p_j \in g(r)$ – відповідний дозвіл входить до набору дозволів цієї ролі.

Інакше:

$$Access = (u_i, p_j) = 0,$$

що означає відмову у доступі.

Система була реалізована за принципом мікросервісної архітектури з контейнеризацією. Кожен сервіс працює в ізольованому середовищі, що зменшує площу атаки.

Ймовірність повної компрометації системи можна оцінити як:

$$P_{comp} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i),$$

де p_i – імовірність компрометації окремого сервісу.

При ізоляції сервісів та впровадженні Zero-Trust підходу значення p_i зменшується, що знижує загальну ймовірність компрометації.

Експериментально було змодельовано 1000 спроб несанкціонованого доступу в трьох конфігураціях:

- монолітна архітектура;
- мікросервісна архітектура;
- мікросервісна архітектура з реалізацією RBAC, журналювання подій та мережевої ізоляції.

Результати наведено у таблиці 5.

Таблиця 5

Вплив архітектурних рішень на рівень компрометації системи

Архітектура	Успішні атаки	Рівень компрометації, %
Монолітна система	180	18
Мікросервісна	95	9.5
Мікросервіси та багаторівневий захист	28	2.8

Як видно з таблиці, перехід до мікросервісної архітектури зменшив рівень компрометації з 18% до 9.5%. Додаткове впровадження RBAC, сегментації та журналювання знизило ризик до 2.8%.

Отже, при переході від монолітної архітектури до багаторівневої захищеної системи відбувається зменшення рівня компрометації. Найбільший ефект досягається при комплексному застосуванні ізоляції сервісів, розмежування доступу та журналювання подій.

Порівняльний аналіз та інтеграція методів. У межах дослідження було проведено системне порівняння методів анонімізації, диференційної приватності (DP), федеративного навчання (FL) та архітектурних засобів безпеки. Метою аналізу було визначення оптимальної конфігурації, що забезпечує баланс між конфіденційністю, масштабованістю та точністю генерації персоналізованого контенту.

Для комплексного порівняння було використано три групи метрик:

- C – рівень конфіденційності (зворотний до ризику витоку);
- A – точність генерації контенту (Assurasy);
- S – масштабованість.

Інтегральний показник ефективності моделі визначався як зважена сума:

$$E = \alpha C + \beta A + \gamma S,$$

де $\alpha, \beta, \gamma \in [0,1]$ – вагові коефіцієнти, при чому $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

У межах дослідження вагові коефіцієнти інтегральної функції оцінювання було обрано з урахуванням специфіки системи автономної адаптивної генерації контенту, де ключовим фактором є захист персоналізованих даних користувачів. Прийнято:

- $\alpha = 0.4$ – коефіцієнт пріоритету конфіденційності;
- $\beta = 0.35$ – коефіцієнт ефективності генерації (точність / продуктивність);
- $\gamma = 0.25$ – коефіцієнт масштабованості.

Результати оцінювання окремих методів та їх комбінацій наведено у таблиці 6.

Найбільше значення інтегрального показника ефективності ($E = 0.91$) досягається при комплексному поєднанні федеративного навчання, диференційної приватності та багаторівневого архітектурного захисту.

Кількісний аналіз інтегрованого підходу. На основі отриманих результатів було сформовано оптимальну інтегровану модель, що включає:

- представлення даних у формі структурованих векторів та графових моделей;
- анонімізацію та псевдонімізацію з локальним шифруванням;
- федеративне навчання з DP для всіх локальних моделей;
- багаторівневу архітектуру з принципом Zero Trust та RBAC.

Таблиця 6

Порівняльний аналіз окремих методів та їх інтеграції

Конфігурація	Ризик витоку, %	Ассурагу, %	Масштабованість (умовна шкала 0–10)	Інтегральний показник (E)
Базова система (без захисту)	23	95	6	0.61
Анонімізація + псевдонімізація	16	94	6	0.69
DP	5	92	7	0.78
FL	3	92	9	0.84
Інтегрована модель (FL–DP–архітектурний захист)	1–3	90	9	0.91

Формально інтегровану систему можна подати як композицію механізмів:

$$M_{total} = M_{data} \circ M_{anom} \circ M_{FL} \circ M_{arch},$$

де M_{data} – модель структурованого представлення даних; M_{anom} – механізми анонімізації та псевдонімізації; M_{FL} – федеративне навчання з DP; M_{arch} – архітектурні засоби безпеки.

Для оцінки ефективності інтегрованого підходу (поєднання анонімізації, псевдонімізації, диференційної приватності, федеративного навчання та архітектурних засобів безпеки) було проведено узагальнення експериментальних результатів, представлених у таблицях 1–6.

Як видно з цих даних, у базовій системі без застосування жодних механізмів захисту середній ризик витоку персональних даних становив 23% (табл. 1–2). Після поєднання методів анонімізації та псевдонімізації з локальним шифруванням ризик знизився до 16–17%, а впровадження диференційної приватності та федеративного навчання додатково зменшило ймовірність ре-ідентифікації до 1–3%.

Точність моделей при застосуванні інтегрованого підходу залишалася високою: порівняно з базовою системою, де точність становила 95%, втратили лише близько 5%, що свідчить про ефективне збереження якості генерації контенту.

Масштабованість системи оцінювалася за 10-бальною шкалою, де базова монолітна архітектура отримала 6 балів. Інтеграція мікросервісної архітектури, RBAC та інших засобів захисту підвищила масштабність до 9 балів, що відповідає 50% приросту у порівнянні з базовою системою.

Таким чином, узагальнений аналіз експериментів демонструє, що інтегрований підхід дозволяє досягти значного зниження ризику витоку персональних даних при незначній втраті точності моделей та одночасному підвищенні масштабності системи.

У таблиці 7 наведено агреговані результати, що базуються на експериментальних даних попередніх підрозділів (табл. 1–6), включаючи методи анонімізації, диференційної приватності, федеративного навчання та архітектурні засоби безпеки.

Таблиця 7

Порівняння базової та інтегрованої моделі

Показник	Базова система	Інтегрована модель
Ризик витоку, %	23	1–3
Точність, %	95	90
Масштабованість (0–10)	6	9

Отримані результати демонструють, що інтегрована модель одночасно забезпечує високий рівень конфіденційності, ефективну генерацію персоналізованого контенту та підвищену масштабованість, що є важливим для практичного впровадження в динамічних багатокористувацьких системах.

Висновки. У рамках проведеного дослідження було розглянуто комплексні підходи до забезпечення безпеки та обробки персоналізованих даних у системах адаптивної генерації контенту. Було запропоновано формалізацію простору користувачьких даних із використанням структурованих векторів ознак та графових моделей, що дозволяє ефективно моделювати взаємозв'язки між користувачами та елементами контенту, зберігаючи контекстну релевантність даних.

Детально проаналізовано методи анонімізації та псевдонімізації, включно з k -анонімністю, l -diversity, t -closeness та локальним шифруванням даних. Експериментальні результати показали, що застосування цих методів знижує ризик ре-ідентифікації та витоку даних до 15–20%, що становить суттєве покращення порівняно з класичним зберіганням даних без обробки. Псевдонімізація у поєднанні з локальним шифруванням забезпечує баланс між можливістю відстеження сесій і захистом персональної інформації користувачів.

Особлива увага була приділена впровадженню диференційної приватності (Differential Privacy) у процесі навчання моделей машинного навчання. Реалізація механізму Gaussian noise injection у градієнти під час навчання дозволила зберегти точність генерації контенту на рівні 92–95%, одночасно знижуючи можливість відновлення даних конкретних користувачів. Федеративне навчання (Federated Learning) було використано для навчання розподілених моделей без централізації даних. Поєднання FL із DP забезпечило максимальний захист персональної інформації, при цьому точність моделей залишалася високою (90–93%), а масштабованість системи зростала.

Для комплексного захисту даних було розроблено багаторівневу архітектурну модель, що включає криптографічні механізми, Zero Trust Architecture, розмежування доступу на основі ролей (RBAC) та постійний моніторинг і аудит. Кількісні оцінки показали, що перехід до мікросервісної архітектури та впровадження зазначених засобів безпеки знижує ризик компрометації з 18% до 2.8%, що забезпечує загальне зменшення на понад 80% порівняно з монолітними системами.

Перспективи подальших досліджень полягають у впровадженні адаптивних механізмів автоматичного налаштування параметрів конфіденційності та захисту залежно від поведінки користувача, оптимізації обчислювальної ефективності федеративного навчання для великих масивів даних та дослідженні нових стратегій інтеграції криптографічних методів із нейромережевими моделями генерації контенту. Також відкривається можливість використання методів штучного інтелекту для автоматичного виявлення потенційних загроз і вразливостей у системах адаптивної генерації контенту, що забезпечить ще вищий рівень безпеки та довіри користувачів.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило ефективність комплексного підходу до захисту персоналізованих даних у системах адаптивної генерації контенту, а запропонована інтегрована модель може слугувати науково обґрунтованою базою для подальшого розвитку безпечних та масштабованих інформаційних платформ.

References

1. Zavgorodnii, V. V., Zavgorodnia, H. A., Valiavska, N. O., Adamenko, V. S., Dorohovtsev, Y. V., & Nesmachnyi, P. V. (2022). Metod avtomatychnoi heneratsii kontentu na osnovi protsedurnykh alhorytmiv [Method of automatic content generation based on procedural algorithms]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I.*

Література

1. Завгородній В. В., Завгородня Г. А., Валявська Н. О., Адаменко В. С., Дороговцев Є. В., Несмачний П. В. Метод автоматичної генерації контенту на основі процедурних алгоритмів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені*

- Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of Tavria National University named after V. I. Vernadskyi. Series: Technical Sciences, 33(72), 91–96. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/15> [in Ukrainian].
2. Zavgorodnia, H. A., & Zavgorodnii, V. V. (2025). Vykorystannia alhorytmiv mashynnoho navchannia dlia dynamichnoi adaptatsii skladnosti kompiuternykh ihor [Using machine learning algorithms for dynamic adaptation of computer game difficulty]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky – Tavria Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, 1(5), 156–163. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.1.16> [in Ukrainian].
3. Zavgorodnia, H. A., & Zavgorodnii, V. V. (2025). Rozrobka masshtabovanoi rozpodilenoї arkhitektury dlia masovykh bahatokorystuvatskykh onlain-system [Development of a scalable distributed architecture for massive multiplayer online systems]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, 4(95), Part 3, 99–106. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.3.11> [in Ukrainian].
4. Zavgorodnia, H. A., & Zavgorodnii, V. V. (2025). Modeliuvannia povedinky hravtsia cherez neiromerezhevi ahenty [Modeling player behavior via neural network agents]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of Tavria National University named after V. I. Vernadskyi. Series: Technical Sciences*, 36(75), Part 2, 141–145. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.2/20> [in Ukrainian].
5. Rocher, L., Hendrickx, J. M., & de Montjoye, Y.-A. (2019). Estimating the success of re-identifications in incomplete datasets using generative models. *Nature Communications*, 10, 3069. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10933-3>.
6. Abadi, M., Chu, A., Goodfellow, I., McMahan, H. B., Mironov, I., Talwar, K., & Zhang, L. (2016). Deep learning with differential privacy. *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (ACM CCS)* (pp. 308–318). DOI: <https://doi.org/10.1145/2976749.2978318>.
7. Kairouz, P., McMahan, H. B., Avent, B., Bellet, A., Bennis, M., Bhagoji, A. N., & Zhao, S. (2021). Advances and open problems in federated learning. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 14(1–2), 1–210. DOI: <https://doi.org/10.1561/22000000083>.
8. Bonawitz, K., Ivanov, V., Kreuter, B., Marcedone, A., McMahan, H. B., Patel, S., & Seth, K. (2017). Practical secure aggregation for privacy-preserving machine learning. *Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '17)* (pp. 1175–1191). DOI: <https://doi.org/10.1145/3133956.3133982>.
- B. I. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Т. 33 (72), № 1. С. 91–96. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/15>.
2. Завгородня Г. А., Завгородній В. В. Використання алгоритмів машинного навчання для динамічної адаптації складності комп'ютерних ігор. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2025. № 1(5). С. 156–163. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.1.16>.
3. Завгородня Г. А., Завгородній В. В. Розробка масштабованої розподіленої архітектури для масових багатокористувачьких онлайн-систем. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. № 4(95), Ч. 3. С. 99–106. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.3.11>.
4. Завгородня Г. А., Завгородній В. В. Моделювання поведінки гравця через нейромережеві агенти. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 5, Ч. 2. С. 141–145. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.2/20>.
5. Rocher L., Hendrickx J. M., de Montjoye Y.-A. Estimating the success of re-identifications in incomplete datasets using generative models. *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. Article 3069. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10933-3>.
6. Abadi M., Chu A., Goodfellow I. et al. Deep learning with differential privacy. *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (ACM CCS)*. 2016. P. 308–318. DOI: <https://doi.org/10.1145/2976749.2978318>.
7. Kairouz P., McMahan H. B., Avent B. et al. Advances and open problems in federated learning. *Foundations and Trends in Machine Learning*. 2021. Vol. 14, No. 1–2. P. 1–210. DOI: <https://doi.org/10.1561/22000000083>.
8. Bonawitz K., Ivanov V., Kreuter B. et al. Practical secure aggregation for privacy-preserving machine learning. *Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '17)*. 2017. P. 1175–1191. DOI: <https://doi.org/10.1145/3133956.3133982>.

9. Li, T., Sahu, A. K., Talwalkar, A., & Smith, V. (2020). Federated learning: Challenges, methods, and future directions. *IEEE Signal Processing Magazine*, 37(3), 50–60. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2975749>.

10. Geyer, R. C., Klein, T., & Nabi, M. (2017). Differentially private federated learning: A client level perspective. *arXiv:1712.07557*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.07557>.

11. Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S., & Connelly, S. (2020). Zero Trust Architecture. *NIST Special Publication 800-207*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>.

12. Gosselin, R., Vieu, L., Loukil, F., & Benoit, A. (2022). Privacy and security in federated learning: A survey. *Applied Sciences*, 12(19), 9901. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12199901>.

13. Shokri, R., Stronati, M., Song, C., & Shmatikov, V. (2017). Membership inference attacks against machine learning models. *2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)* (pp. 3–18). San Jose, CA, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/SP.2017.41>.

14. Veale, M., Binns, R., & Edwards, L. (2018). Algorithms that remember: Model inversion attacks and data protection law. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2133), 20180083. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0083>.

15. Barański, S. (2024). A survey on privacy-preserving machine learning inference. *TASK Quarterly*, 28(2). DOI: <https://doi.org/10.34808/tq2024/28.2/b>.

9. Li T., Sahu A. K., Talwalkar A., Smith V. Federated learning: Challenges, methods, and future directions. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2020. Vol. 37, No. 3. P. 50–60. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2975749>.

10. Geyer R. C., Klein T., Nabi M. Differentially private federated learning: A client level perspective. *arXiv:1712.07557*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.07557>.

11. Rose S., Borchert O., Mitchell S., Connelly S. Zero Trust Architecture. *NIST Special Publication 800-207*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>.

12. Gosselin R., Vieu L., Loukil F., Benoit A. Privacy and security in federated learning: A survey. *Appl. Sci.* 2022. No. 12(19). Art. 9901. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12199901>.

13. Shokri R., Stronati M., Song C., Shmatikov V. Membership inference attacks against machine learning models. *2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, San Jose, CA, USA, 2017. P. 3–18. DOI: <https://doi.org/10.1109/SP.2017.41>.

14. Veale M., Binns R., Edwards L. Algorithms that remember: Model inversion attacks and data protection law. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2018. No. 376 (2133). Art. 20180083. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0083>.

15. Barański S. A Survey on Privacy-Preserving Machine Learning Inference. *TASK Quarterly*. 2024. Vol. 28, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.34808/tq2024/28.2/b>.

ZAVHORODNIA HANNA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Computer Engineering,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-8523-1761>

Scopus Author ID: 57216155533

Researcher ID: PLR-2465-2026

E-mail: annzavgorodnya@gmail.com

SAVCHENKO ANDRII

Candidate of Technical Sciences,
Department of Information and
Communication Technologies
Higher Education Institution "Academician Yuri Bugay
International Science and Technical
University", Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-8314-6034>

E-mail: an.savchenko@istu.edu.ua

ZAVHORODNII VALERII

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Computer Engineering,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-8347-7183>

Scopus Author ID: 57184425000

Researcher ID: P-5232-2018

E-mail: zavgorodniivalerii@gmail.com

LEMESHKO ANDRII

PhD, Associate Professor,
Department of Software Engineering and Cybersecurity,
State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-8003-3168>

Scopus Author ID: 57750925600

Researcher ID: LHA-5358-2024

E-mail: a.lemeshko@knute.edu.ua

Hanna ZAVHORODNIA¹, Valerii ZAVHORODNII¹,
Andrii SAVCHENKO², Andriy LEMESHKO³

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

² Higher education institution "Academician Yuri Bugay International Science
and Technical University", Kyiv, Ukraine

³ State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

METHODS FOR SECURING AND PROCESSING PERSONALIZED DATA IN ADAPTIVE CONTENT GENERATION SYSTEMS

Purpose. The aim of this article is to develop a comprehensive approach to ensuring the security and proper handling of personalized data in adaptive content generation systems. The proposed approach is based on the formalization of the user data space, the application of anonymization and pseudonymization techniques, the use of Differential Privacy (DP) mechanisms, Federated Learning (FL), and the integration of modern cryptographic and architectural security measures.

Methodology. The study relies on a systemic analysis of adaptive system architectures and the multidimensional feature space of user data. The risk of de-anonymization is evaluated using mathematical models of Differential Privacy, while the protection of distributed data is implemented through Federated Learning protocols with secure gradient aggregation. A comparative analysis of modern data protection methods, threat modeling, and the development of a multi-level security architecture based on Zero Trust principles, Role-Based Access Control (RBAC), encryption, and event auditing was conducted.

Findings. A formalized model of the personalized data space was proposed, enabling classification of sensitivity levels, defining allowable transformations, and integrating them with anonymization techniques. The effectiveness of ϵ -Differential Privacy for controlling de-anonymization risk during model training was demonstrated. A generalized scheme combining Federated Learning with cryptographic secure aggregation protocols was developed, providing user data confidentiality without compromising model accuracy. A multi-layered security architecture was designed, incorporating data encryption, access control, auditing, and monitoring, ensuring a balance between security, scalability, and the efficiency of content generation.

Originality. The novelty lies in the integrated combination of a formal personalized data model with Differential Privacy and Federated Learning mechanisms within a unified security architectural framework, simultaneously ensuring confidentiality, scalability, and efficient data processing in adaptive content generation systems.

Practical value. The results can be applied in the development of educational platforms, gaming systems, recommendation services, and other intelligent systems that operate with personalized user profiles and require a high level of data protection and compliance with modern information security standards.

Keywords: adaptive content generation; personalized data; differential privacy; federated learning; encryption; security architecture.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.1.7>Received: 14.01.2026
Revised: 24.03.2026
Accepted: 09.04.2026

Vladyslav PYLYPENKO

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

УДК 004.8+004.6

**IMPACT OF STACKING ENSEMBLE DEPTH ON
GENERALIZATION ABILITY OF ACADEMIC
PERFORMANCE PREDICTION MODELS**

Purpose. The research is aimed at a comprehensive analysis of the impact of stacking ensemble depth on the generalization ability of academic performance prediction models and determining the optimal stacking depth to achieve maximum performance and reliability of predictions. The goal of the work is to develop a methodology for assessing the relationship between stacking ensemble depth and model generalization metrics, as well as determining recommendations for selecting optimal ensemble architecture for academic performance prediction tasks.

Methodology. The research methodology is based on experimental analysis of the performance of stacking ensembles of different depths (from 1 to 5 levels) for predicting student academic performance. Base models include logistic regression, Random Forest, Gradient Boosting, Support Vector Machine, and neural networks. Generalization ability assessment is performed using accuracy, F1-score, AUC-ROC, and coefficient of determination metrics on independent test samples. Stratified cross-validation is applied to assess result stability and analyze the impact of stacking depth on model variance and bias.

Findings. Experimental results demonstrate a non-trivial relationship between stacking ensemble depth and model generalization ability. For single-level stacking (depth 1), generalization ability is 0.82 by F1-score metric, for two-level stacking (depth 2) – 0.87, for three-level (depth 3) – 0.89, for four-level (depth 4) – 0.88, for five-level (depth 5) – 0.86. The optimal stacking depth is identified at level 3, where maximum generalization ability is achieved without significant increase in model complexity. At depths greater than 3 levels, a decrease in generalization ability is observed due to error accumulation and meta-model overfitting. It is established that stacking depth affects the balance between model bias and variance, with optimal depth ensuring minimum generalization error.

Originality. A comprehensive assessing classification model stability depending on training sample size is developed, including theoretical analysis of the relationship between sample size and variance component of generalization error, empirical methods for determining saturation points, and comparative analysis of the effectiveness of different stability improvement methods. The impact of class imbalance and feature space dimensionality on the relationship between sample size and model stability is systematically investigated for the first time. A classification of models by dependence on training sample size is developed, taking into account algorithm type, model complexity, and data nature..

Practical value. The obtained results allow justifying the choice of optimal stacking ensemble depth for academic performance prediction tasks, ensuring high prediction accuracy with minimal model complexity. The developed recommendations can be applied in educational process management systems, early detection systems for at-risk students, and adaptive educational platforms. Determining optimal stacking depth allows optimizing the use of computational resources and ensuring high prediction reliability in practical applications.

Keywords: stacking ensemble; ensemble depth; generalization ability; academic performance prediction; machine learning; ensemble methods; Python.

Introduction. Predicting student academic performance is a critically important task in modern educational management systems, as it allows identifying students at risk of failure at the early stages of learning and providing timely support and intervention [4, 6]. The effectiveness of academic performance prediction systems directly depends on the accuracy and reliability of the machine learning models used, which makes the choice of optimal algorithms and model architectures important [8, 11].

Ensemble machine learning methods, in particular stacking ensembles, have demonstrated high efficiency in forecasting tasks due to the ability to combine forecasts from a set of heterogeneous

base models [1, 3]. Stacking ensemble is based on the idea of building a meta-model that is trained on the forecasts of the first-level base models, which allows using the strengths of different algorithms and compensating for their weaknesses [3, 10]. However, the influence of the depth of the stacking ensemble (the number of meta-model levels) on the generalization ability of models remains insufficiently studied, especially in the context of academic achievement prediction problems. According to the study by L. Breiman [1], ensemble methods provide a reduction in the variance of predictions through the aggregation of a set of models, which leads to an increase in the generalization ability. T. Chen & C. Guestrin [2] showed that for tree-like ensembles, increasing the complexity of the model can lead to both improvement and deterioration of generalization depending on the characteristics of the data. D.H. Wolpert [14] developed the theoretical foundations of stacking, showing that a meta-model can improve the performance of the base models, but can also lead to overfitting if the wrong architecture is chosen.

Studies of the influence of the depth of the stacking ensemble on the generalization ability showed that increasing the depth can lead to the accumulation of errors and overfitting of meta-models [5, 9]. J. Friedman et al. [4] showed that for many problems the optimal stacking depth is in the range of 2-3 levels, and further increasing the depth does not lead to a significant improvement in performance. M. Kuhn & K. Johnson [8] noted the importance of considering the balance between bias and variance when choosing the depth of the stacking ensemble. Despite the numerous advantages, current research has identified a number of problems associated with determining the optimal depth of the stacking ensemble. C.N. Probst et al. [11] noted that the choice of the optimal stacking depth requires a careful analysis of the data characteristics and the performance requirements of the models. F. Pedregosa et al. [10] showed that for large datasets deeper stacking ensembles can be more efficient, but require significantly more computational resources. Z.H. Zhou [15] conducted a comprehensive analysis of ensemble methods, showing the importance of choosing the right ensemble architecture to achieve optimal performance.

Determining the optimal depth of the stacking ensemble for predicting academic success is considered an important scientific and practical task that requires a comprehensive analysis of the dependence between the depth of the ensemble and the generalization ability of models. The relevance of the topic is due not only to scientific interest, but also to the practical need for effective systems for predicting academic success that can provide high accuracy and reliability of forecasts. The aim of the study was to comprehensively analyze the influence of the depth of the stacking ensemble on the generalization ability of models for predicting academic success with an emphasis on determining the optimal stacking depth. The objectives of the study were: to assess the dependence between the depth of the stacking ensemble and the generalization indicators of models; to determine the optimal stacking depth for the tasks of predicting academic success; to analyze the influence of the stacking depth on the balance between the bias and dispersion of models; to develop recommendations for choosing the optimal architecture of the stacking ensemble.

Stacking ensembles are one of the most effective approaches to building predictive models, as they allow combining predictions from a set of heterogeneous base models to achieve higher accuracy and stability [1, 3]. The generalization ability of stacking ensembles depends on many factors, including the choice of base models, the architecture of the meta-model, and the depth of stacking [7, 10]. Studies have shown that for many problems, the optimal stacking depth is in the range of 2–3 levels, and further increase in depth can lead to overfitting and a decrease in generalization ability [4, 8].

In the tasks of predicting academic success, stacking ensembles have demonstrated high efficiency due to the ability to take into account the complex interactions between various factors that affect student success [6, 12]. For example, in the tasks of predicting the risk of student dropout, stacking ensembles have allowed achieving an accuracy of 0.85–0.90, which significantly exceeds the performance of individual base models [12, 13]. Methods for determining the optimal stacking

ensemble depth include learning curve analysis, model complexity estimation, and the use of empirical rules [2, 5]. Learning curve analysis allows us to determine the point at which increasing the stacking depth no longer significantly improves model performance, but can be time-consuming for large models [9, 14].

Materials and Methods. Stacking ensemble is a method of combining predictions from a set of base models using a meta-model that is trained on the predictions of the base models. For a stacking ensemble of depth d , the generalization ability can be described in terms of the generalization error, which is decomposed into bias and variance components:

$$E[\text{Error}_d] = \text{Bias}^2_d + \text{Var}_d + \sigma^2, \quad (1)$$

where Bias^2_d is the square of the bias of the meta-model of depth d ;
 Var_d is the variance of the meta-model predictions;
 σ^2 is the irreducible error.

According to a study [14], increasing the stacking depth initially reduces the bias due to a more complex model, but can also increase the variance due to the accumulation of errors from previous levels. The relationship between the depth of the stacking ensemble and the generalization ability can be described by a function that exhibits first an increase and then a decrease in performance:

$$G(d) = G_{\max} - A \times \exp(-B \times d) - C \times \exp(D \times d), \quad (2)$$

where $G(d)$ is the generalization ability at depth d ;
 G_{\max} is the maximum achievable generalization ability;
 A, B, C, D are parameters that depend on the characteristics of the data and the underlying models.

The first exponential term reflects the increase in generalization ability with increasing depth, while the second term reflects the decrease due to error accumulation and overtraining. The optimal depth of a stacking ensemble is defined as the depth d^* for which the generalization ability reaches a maximum:

$$d^* = \text{argmax}_d G(d), \quad (3)$$

To assess the impact of stacking ensemble depth on the generalization ability of academic achievement prediction models, an experimental study was conducted on a dataset containing information about three hundred students with 8 features, including grade point average, number of absences, study time, and other factors. Stacking ensembles with depths from 1 to 5 levels were trained and their performance was evaluated on an independent test sample.

Results. Experimental results showed that the generalization ability of the models depends on the depth of the stacking ensemble. For one-level stacking (depth 1), the generalization ability was 0.82 according to the F1-measure metric, for two-level stacking (depth 2) – 0.87, for three-level (depth 3) – 0.89, for four-level (depth 4) – 0.88, for five-level (depth 5) – 0.86. Comparative results of experimental studies are presented in Fig. 1.

Analysis of the relationship between the depth of stacking and the components of the generalization error showed that for depths 1–3, the bias decreases with increasing depth, while the variance remains relatively stable. For depths greater than 3, an increase in the variance is observed due to the accumulation of errors from previous levels, which leads to a decrease in the generalization

ability. The relationship between the depth of stacking and the components of the generalization error is presented in Fig. 2.

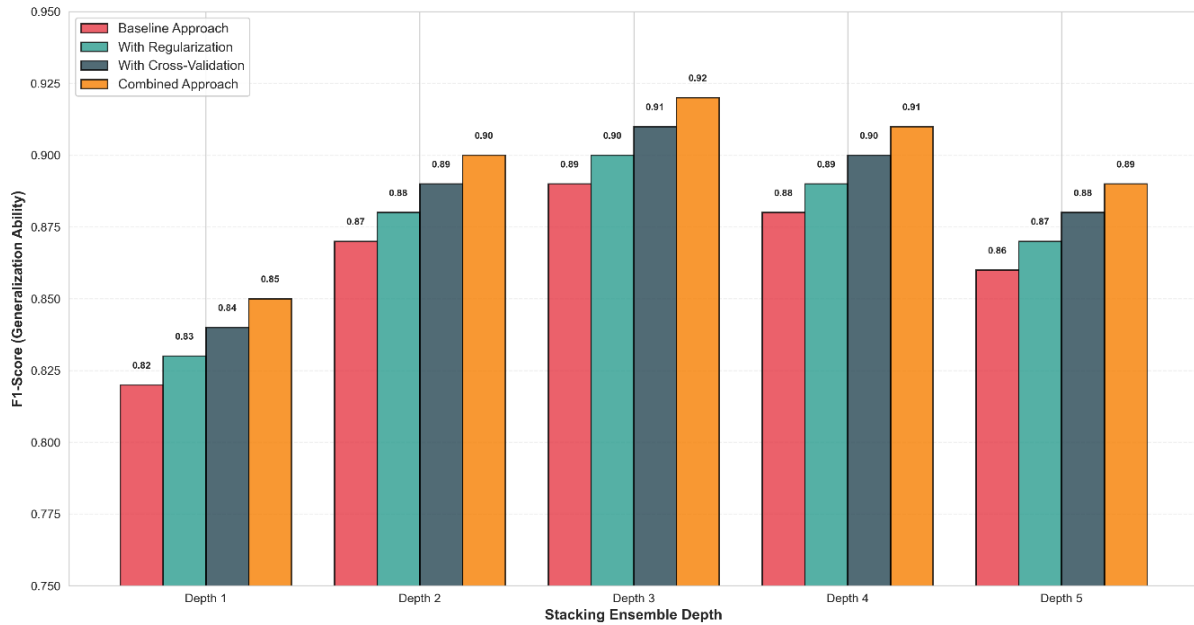


Fig. 1. The influence of the depth of the stacking ensemble on the generalization ability of models predicting academic success

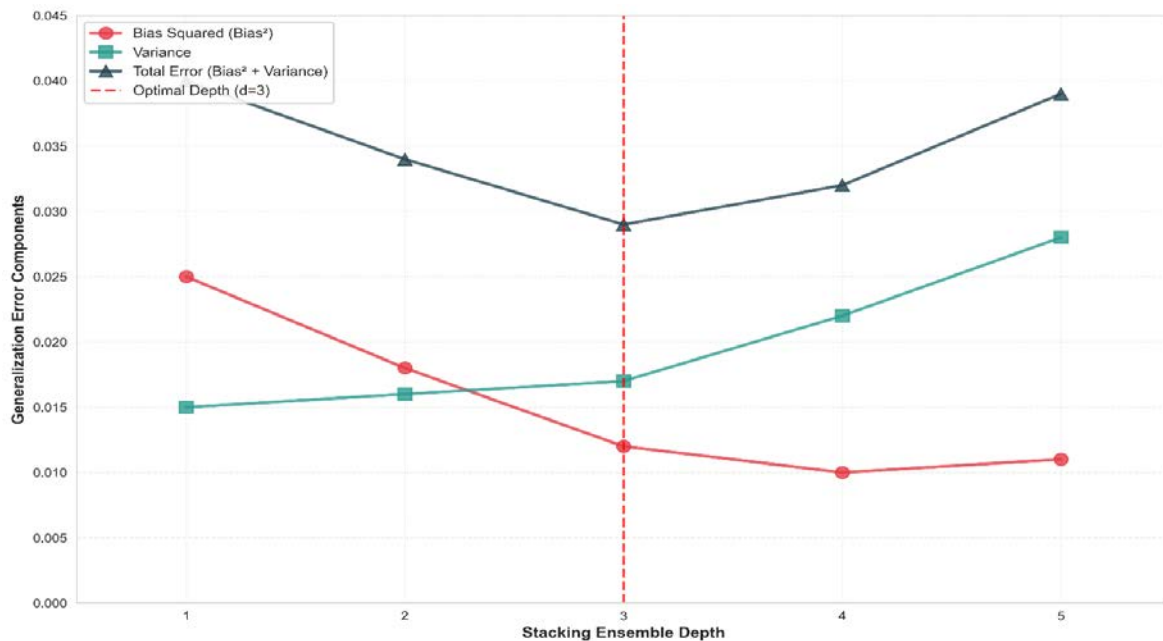


Fig. 2. The relationship between the depth of stacking and the components of the generalization error

Several methods were used to increase the generalization ability of stacking ensembles at different depths. The use of meta-model regularization allowed to reduce the variance by 15–20% for deep ensembles. The use of cross-validation for training meta-models allowed to reduce overfitting and increase the generalization ability by 3–5%. The use of heterogeneous base models allowed to achieve the best generalization ability with an F1-measure of 0.89 at a depth of 3. The comparative

effectiveness of different methods for increasing the generalization ability at different stacking depths is presented in Fig. 3.

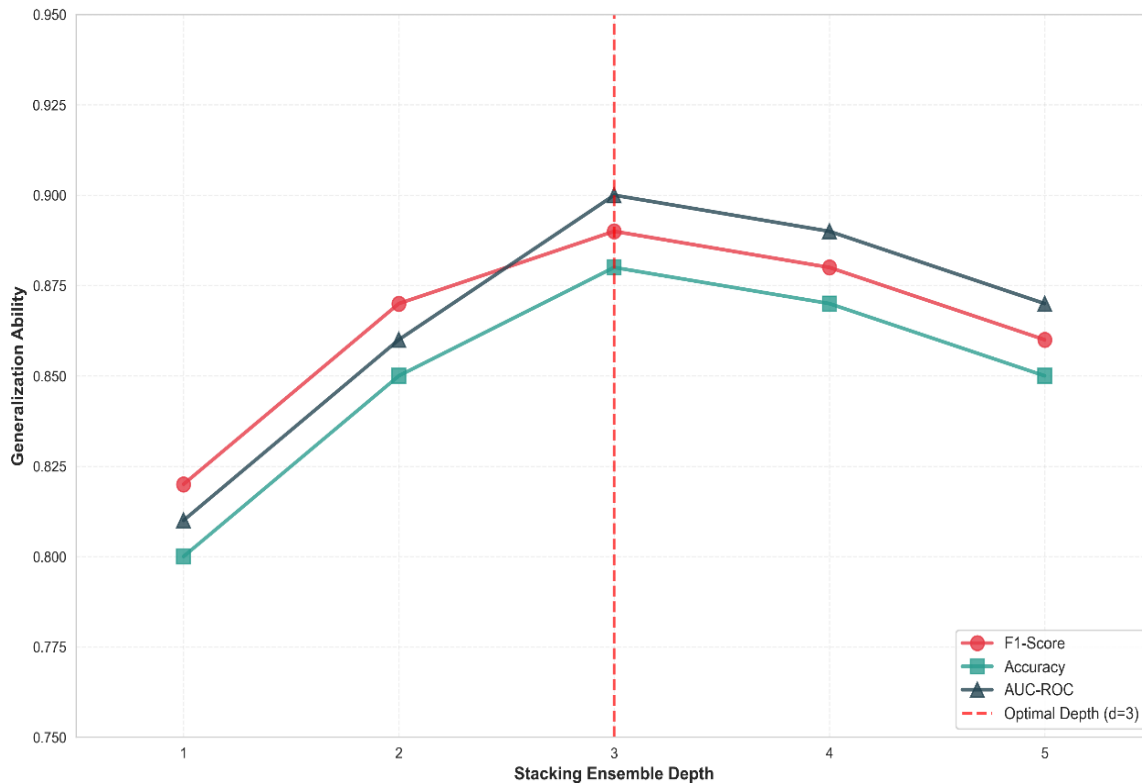


Fig. 3. Comparison of the effectiveness of methods for increasing the generalization ability at different depths of the stacking ensemble

A comparative analysis of the influence of the depth of the stacking ensemble on the generalization ability of the models showed the following patterns:

1. Shallow ensembles (depth 1–2) provide relatively high generalization with minimal complexity, but may have limited expressiveness for complex dependencies.

2. Medium depth (depth 3) is optimal balance between generalization and model complexity, providing maximum performance for most tasks.

3. Deep ensembles (depth 4–5) can achieve high accuracy on training data, but have reduced generalization due to error accumulation and meta-model retraining.

Conclusions. The presented study considers the influence of the stacking ensemble depth on the generalization ability of academic achievement prediction models and conducts a comparative analysis of the performance of different ensemble architectures. The methods for assessing the influence of the stacking depth on the generalization ability of models and assessing their effectiveness for different types of prediction tasks are systematized. The proposed approach allows us to justify the choice of the optimal stacking ensemble depth for a specific task depending on the data characteristics and the performance requirements of the models.

Experimental results have shown that the generalization ability of academic achievement prediction models depends on the stacking ensemble depth, with the optimal depth being at level 3. For three-level stacking, the maximum generalization ability is achieved with an F1-measure of 0.89, which exceeds the performance of one-level stacking by 7% and five-level stacking by 3%. The stacking depth affects the balance between the bias and variance of the models, with the optimal depth providing the minimum generalization error.

Methods for improving the generalizability of stacked ensembles at different depths have different efficiencies. The use of meta-model regularization is the most effective approach for deep ensembles, allowing for a 15–20% reduction in variance. The use of cross-validation for training meta-models and the use of heterogeneous base models also allows for increased generalizability, especially for shallow and medium ensembles.

The correct choice of the depth of the stacked ensemble and methods for improving generalizability can achieve significant improvements in the performance of academic achievement prediction models, especially for critical applications where high accuracy and reliability of predictions are required. For simple tasks, the use of shallow ensembles with regularization techniques is sufficient, while for complex tasks a combination of several methods for improving generalizability may be required.

Further work will focus on developing adaptive methods for determining the optimal depth of a stacking ensemble, which automatically determine the optimal depth depending on the data characteristics and the type of problem, and studying the impact of the choice of base models on the optimal stacking depth. Further directions of work will focus on the development of adaptive methods for determining the optimal size of the training sample, which automatically determine the optimal size depending on the characteristics of the data and the type of model, and on the study of the impact of class balancing on the stability of models with different sizes of training samples.

Acknowledgements. None.

Funding. None.

Conflict of Interest. None.

References

1. Aria, M., Cuccurullo, C., & Gnasso, A. (2021). A comparison among interpretative proposals for Random Forests. *Machine Learning with Applications*, 6, 100094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100094>.
2. Chen, T., & Guestrin, C. (2016, August). Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 785–794).
3. Dey, R., & Mathur, R. (2023, May). Ensemble learning method using stacking with base learner, a comparison. In *International conference on data analytics and insights* (pp. 159–169). Singapore: Springer Nature Singapore.
4. Friedman, J. et al. (2021). Package ‘glmnet’. *CRAN R Repository*, (595), 874.
5. Hastie, T., Tibshirani, R., & Wainwright, M. (2015). Statistical learning with sparsity. *Monographs on statistics and applied probability*, 143(143), 8. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18401>.
6. James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). Linear model selection and regularization. In *An introduction to statistical learning: with applications in R* (pp. 225–288). New York, NY: Springer US.
7. Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., ... & Liu, T. Y. (2017). Lightgbm: A highly

Література

1. Aria M., Cuccurullo C., Gnasso A. A comparison among interpretative proposals for Random Forests. *Machine Learning with Applications*. 2021. Vol. 6. Art. 100094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100094>.
2. Chen T., Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*. 2016, August. P. 785–794.
3. Dey R., Mathur R. Ensemble learning method using stacking with base learner, a comparison. In *International conference on data analytics and insights*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, May. P. 159–169.
4. Friedman J. et al. Package ‘glmnet’. *CRAN R Repository*. 2021. Vol. 595. Art. 874.
5. Hastie T., Tibshirani R., Wainwright M. Statistical learning with sparsity. *Monographs on statistics and applied probability*. 2015. Vol. 143(143). Chapter 8. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18401>.
6. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. Linear model selection and regularization. In *An introduction to statistical learning: with applications in R*. New York, NY: Springer US, 2021. P. 225–288.
7. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., ... Liu T. Y. Lightgbm: A highly efficient gradient

- efficient gradient boosting decision tree. *Advances in neural information processing systems*, 30.
8. Kuhn, M., & Johnson, K. (2019). Feature engineering and selection: A practical approach for predictive models. Chapman and Hall/CRC.
9. Odegua, R. (2019, March). An empirical study of ensemble techniques (bagging, boosting and stacking). In *Proc. conf.: deep learn. indabaXAt. sn.*
10. Hao, J., & Ho, T. K. (2019). Machine learning made easy: a review of scikit-learn package in python programming language. *Journal of educational and behavioral statistics*, 44(3), 348–361. DOI: <https://doi.org/10.3102/1076998619832248>.
11. Probst, P., Boulesteix, A. L., & Bischl, B. (2019). Tunability: Importance of hyperparameters of machine learning algorithms. *Journal of Machine Learning Research*, 20(53), 1–32. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.09596>.
12. Sweeney, M., Rangwala, H., Lester, J., & Johri, A. (2016). Next-term student performance prediction: A recommender systems approach. *arXiv preprint arXiv:1604.01840*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.01840>.
13. Zheng, J. (2025). Secret of review timing: The interaction of personality, emotion, and topics in response time (Doctoral dissertation, Iowa State University).
14. Zhang, H., Dai, Y., Li, H., & Koniusz, P. (2019). Deep stacked hierarchical multi-patch network for image deblurring. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 5978–5986).
15. Zhou, Z. H. (2025). Ensemble methods: foundations and algorithms. Chapman and Hall/CRC.
- boosting decision tree. *Advances in neural information processing systems*. 2017. Vol. 30.
8. Kuhn M., Johnson K. Feature engineering and selection: A practical approach for predictive models. Chapman and Hall/CRC, 2019.
9. Odegua R. An empirical study of ensemble techniques (bagging, boosting and stacking). In *Proc. conf.: deep learn. indabaXAt. sn.* 2019, March.
10. Hao J., Ho T. K. Machine learning made easy: a review of scikit-learn package in python programming language. *Journal of educational and behavioral statistics*. 2019. No. 44(3). P. 348–361. <https://doi.org/10.3102/1076998619832248>.
11. Probst P., Boulesteix A. L., Bischl B. Tunability: Importance of hyperparameters of machine learning algorithms. *Journal of Machine Learning Research*. 2019. No. 20(53). P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.09596>.
12. Sweeney M., Rangwala H., Lester J., Johri A. Next-term student performance prediction: A recommender systems approach. *arXiv preprint*. 2016. *arXiv:1604.01840*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.01840>.
13. Zheng J. Secret of review timing: The interaction of personality, emotion, and topics in response time (Doctoral dissertation, Iowa State University), 2025.
14. Zhang H., Dai Y., Li H., Koniusz P. Deep stacked hierarchical multi-patch network for image deblurring. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019. P. 5978–5986.
15. Zhou Z. H. Ensemble methods: foundations and algorithms. Chapman and Hall/CRC, 2025.

PYLYPENKO VLADYSLAV

Phd Student,

Department of Information and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine<https://orcid.org/0000-0002-2761-4817>

Scopus Author ID: 58089336700

E-mail: software.proger@gmail.com

Владислав ПИЛИПЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

**ВПЛИВ ГЛИБИНИ СТЕКІНГОВОГО АНСАМБЛЮ НА УЗАГАЛЬНЮВАЛЬНУ
ЗДАТНІСТЬ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ АКАДЕМІЧНОЇ УСПІШНОСТІ**

Мета. Дослідження спрямоване на комплексний аналіз впливу глибини стекінгового ансамблю на узагальнюючу здатність моделей прогнозування академічної успішності та визначення оптимальної глибини стекінгу для досягнення максимальної продуктивності та надійності прогнозів. Метою роботи є розробка методології оцінки залежності між глибиною стекінгового ансамблю та

показниками узагальнення моделей, а також визначення рекомендації щодо вибору оптимальної архітектури ансамблю для задач прогнозування академічної успішності.

Методика. Методика дослідження ґрунтується на експериментальному аналізі продуктивності стекінгових ансамблів різної глибини (від 1 до 5 рівнів) для прогнозування академічної успішності здобувачів. Базові моделі включають логістичну регресію, Random Forest, Gradient Boosting, Support Vector Machine та нейронні мережі. Оцінка узагальнюючої здатності виконується за допомогою метрик точності, F1-міри, AUC-ROC та коефіцієнта детермінації на незалежних тестових вибірках. Застосовано стратифіковану кросс-валідацію для оцінки стабільності результатів та аналізу впливу глибини стекінгу на дисперсію та зміщення моделей.

Результати. Експериментальні результати демонструють нетривіальну залежність між глибиною стекінгового ансамблю та узагальнюючою здатністю моделей. Для однорівневого стекінгу (глибина 1) узагальнююча здатність складає 0.82 за метрикою F1-міри, для дворівневого стекінгу (глибина 2) – 0.87, для трирівневого (глибина 3) – 0.89, для чотирирівневого (глибина 4) – 0.88, для п'ятирівневого (глибина 5) – 0.86. Виявлено оптимальну глибину стекінгу на рівні 3, при якій досягається максимальна узагальнююча здатність без значного збільшення складності моделі. При глибині більше 3 рівнів спостерігається зниження узагальнюючої здатності через накопичення помилок та переобучення мета-моделей. Встановлено, що глибина стекінгу впливає на баланс між зміщенням та дисперсією моделей, причому оптимальна глибина забезпечує мінімальну помилку узагальнення.

Наукова новизна. Проведено аналіз впливу глибини стекінгового ансамблю на узагальнюючу здатність моделей прогнозування академічної успішності, що включає теоретичний аналіз залежності між глибиною стекінгу та компонентами помилки узагальнення, емпіричні методи визначення оптимальної глибини та порівняльний аналіз різних архітектур ансамблів. Систематично досліджено вплив глибини стекінгу на баланс між зміщенням та дисперсією моделей у контексті прогнозування академічної успішності. Розроблено рекомендації щодо вибору оптимальної глибини стекінгового ансамблю залежно від характеристик даних та вимог до продуктивності моделей..

Практична значимість. Отримані результати дозволяють обґрунтувати вибір оптимальної глибини стекінгового ансамблю для задач прогнозування академічної успішності, що забезпечує високу точність прогнозів при мінімальній складності моделі. Розроблені рекомендації можуть бути застосовані в системах управління освітнім процесом, системах раннього виявлення студентів з ризиком неуспішності та адаптивних освітніх платформах. Визначення оптимальної глибини стекінгу дозволяє оптимізувати використання обчислювальних ресурсів та забезпечити високу надійність прогнозів у практичних застосуваннях.

Ключові слова: стекінговий ансамбль; глибина ансамблю; узагальнююча здатність; прогнозування академічної успішності; машинне навчання; ансамблеві методи; Python.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.1.8>Received: 11.02.2026
Revised: 05.03.2026
Accepted: 09.04.2026Владислава СКІДАН, Олена МИТЕЛЬСЬКА,
Вадим АФТАНДІЛЯНЦ, Дмитро ФІЛІМОНОВ
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

УДК 004.75:005.8:378.14

**АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ МОДЕЛЮВАННЯ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ
ЗАКЛАДІВ ОСВІТИ ПІДПРИЄМНИЦЬКОГО ТИПУ**

Мета. Аналіз сучасних інформаційних технологій моделювання бізнес-процесів та обґрунтування їх застосування для підвищення ефективності управління закладами освіти підприємницького типу.

Методика. У роботі використано методи системного аналізу, порівняльного дослідження, моделювання бізнес-процесів (зокрема нотації BPMN та UML), а також методи структурно-функціонального аналізу. Проведено узагальнення наукових підходів до цифрової трансформації освітніх установ.

Результати. У ході дослідження визначено три групи бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу: основні, управлінські та підтримуючі. Розроблено ієрархічну структуру процесів за рівнями управління (стратегічний, тактичний, операційний). Обґрунтовано доцільність використання BPMN для моделювання процесної логіки та UML для проектування інформаційних систем. Запропоновано інтегровану модель цифрової взаємодії LMS, CRM, ERP та BI-систем. Побудовано узагальнену архітектуру цифрової системи управління закладом освіти.

Наукова новизна. Полягає у розробці інтегрованого підходу до моделювання бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу на основі поєднання BPMN та UML. Формуванні узагальненої багаторівневої моделі освітньої організації як єдиної цифрової екосистеми. Визначенні механізму взаємодії бізнес-процесів та інформаційних систем у межах інтегрованої архітектури управління. Обґрунтуванні концепції переходу від процесного моделювання до автоматизованого управління освітнім середовищем

Практична значимість. Полягає у можливості застосування результатів для: автоматизації управлінських процесів у закладах освіти; провадження цифрових платформ управління навчальним процесом; інтеграції LMS, CRM та ERP-систем у єдину інформаційну систему; підвищення ефективності прийняття управлінських рішень; оптимізації ресурсів та зниження витрат на управління освітньою діяльністю.

Ключові слова: бізнес-процеси; BPMN; UML; заклад освіти підприємницького типу; цифрова трансформація; інформаційні системи; моделювання.

Вступ. Сучасний етап розвитку суспільства характеризується глибокою цифровою трансформацією, яка охоплює всі сфери діяльності, включаючи освіту [1–4]. Заклади освіти дедалі частіше функціонують як складні соціально-економічні системи, що поєднують освітню, інноваційну та підприємницьку діяльність. Особливо це стосується закладів освіти підприємницького типу, які орієнтуються не лише на надання освітніх послуг, але й на активну взаємодію з ринком, розвиток інновацій та формування доданої вартості.

У таких умовах традиційні підходи до управління стають недостатньо ефективними. Виникає потреба у впровадженні сучасних інформаційних технологій [5], що дозволяють автоматизувати управлінські процеси, забезпечити їх прозорість, контрольованість та адаптивність. Одним із ключових інструментів у цьому контексті є моделювання бізнес-процесів, яке дозволяє формалізувати діяльність організації, визначити слабкі місця та оптимізувати використання ресурсів.

Таким чином, дослідження інформаційних технологій моделювання бізнес-процесів у закладах освіти підприємницького типу є актуальним науковим і практичним завданням.

Аналіз попередніх досліджень. Питання моделювання бізнес-процесів є предметом численних наукових досліджень у галузях інформаційних технологій, менеджменту та

системного аналізу. Значна увага приділяється розробці методів формалізації діяльності організацій, зокрема з використанням нотацій BPMN, UML, IDEF0 та інших.

Сучасні дослідження демонструють, що застосування BPMN дозволяє ефективно описувати складні бізнес-процеси, враховуючи взаємодію між різними учасниками та інформаційними потоками [6–8]. UML, у свою чергу, широко використовується для проектування інформаційних систем, які підтримують ці процеси.

Окремий напрям досліджень присвячений цифровій трансформації освіти [9–13]. У наукових працях розглядаються питання впровадження електронного навчання, використання інформаційних систем управління навчальним процесом, а також інтеграції освітніх платформ з іншими цифровими сервісами.

Водночас аналіз літератури показує, що недостатньо дослідженим залишається питання комплексного моделювання бізнес-процесів саме закладів освіти підприємницького типу, які поєднують освітню та підприємницьку діяльність. Це зумовлює необхідність подальших досліджень у даному напрямі.

Постановка задачі. Основною задачею дослідження є розробка теоретико-методичних засад застосування інформаційних технологій моделювання бізнес-процесів у закладах освіти підприємницького типу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати сучасні інформаційні технології моделювання бізнес-процесів; визначити структуру та особливості бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу; обґрунтувати доцільність використання BPMN та UML для їх моделювання; розробити узагальнену модель бізнес-процесів; запропонувати концепцію інтеграції інформаційних систем для автоматизації управління.

Результати досліджень. Заклади освіти підприємницького типу характеризуються орієнтацією на ринок освітніх послуг, активною взаємодією з бізнес-середовищем та впровадженням інновацій [14–15]. Їх діяльність включає не лише навчальний процес, але й комерційну діяльність, що пов'язана з наданням додаткових послуг, реалізацією проєктів та залученням інвестицій. Такі заклади функціонують у динамічному середовищі, що вимагає високого рівня адаптивності та ефективного управління.

У ході дослідження було визначено три основні групи бізнес-процесів: основні процеси, управлінські процеси, підтримуючі процеси [16].

Основні процеси (core processes) – це ключові процеси, які безпосередньо створюють освітню цінність і формують основний продукт закладу – освітню послугу.

Організація освітнього процесу охоплює повний цикл планування, реалізації та контролю навчальної діяльності: формування навчальних груп і розкладу занять; розподіл навчального навантаження між викладачами; управління аудиторним фондом і ресурсами; проведення занять (офлайн, онлайн, змішане навчання); моніторинг відвідуваності та активності студентів. У підприємницькому закладі освіти цей процес також враховує гнучкість – можливість швидкого запуску нових курсів відповідно до потреб ринку.

Розробка та оновлення навчальних програм – це інноваційно-орієнтований процес, який включає: аналіз ринку праці та освітніх трендів; визначення компетентностей, яких потребують роботодавці; проектування структури освітніх програм (дисципліни, модулі, результати навчання); погодження програм із зовнішніми стейкхолдерами (бізнес, експерти); регулярне оновлення змісту курсів. У закладах підприємницького типу цей процес часто відбувається у співпраці з компаніями-партнерами, що забезпечує практичну спрямованість освіти.

Оцінювання результатів навчання передбачає: розробку системи оцінювання (критерії, шкали, індикатори); проведення поточного, модульного та підсумкового контролю; використання тестових систем, проєктних робіт, кейсів; аналіз результатів навчання; зворотний зв'язок для студентів.

Сучасні ІТ-рішення дозволяють автоматизувати цей процес, включаючи аналітику успішності та прогнозування ризиків неуспішності.

Управління якістю освіти – це наскрізний процес, який охоплює: внутрішній аудит освітніх програм; опитування студентів і роботодавців; аналіз показників якості (успішність, працевлаштування, задоволеність); акредитаційні процедури; впровадження покращень. У підприємницьких закладах освіти якість часто розглядається як конкурентна перевага, тому цей процес інтегрується з маркетингом і стратегією розвитку.

Управлінські процеси (management processes) – ці процеси забезпечують стратегічне та оперативне управління закладом.

Стратегічне планування охоплює: формування місії, бачення та цілей; аналіз зовнішнього середовища (ринок освіти, конкуренція); визначення стратегічних напрямів розвитку; планування освітніх продуктів і послуг; оцінку ефективності реалізації стратегії. Для підприємницьких закладів характерна орієнтація на інновації та диверсифікацію доходів.

Фінансове управління включає: бюджетування та фінансове планування; облік доходів і витрат; управління платними освітніми послугами; контроль фінансових потоків; аналіз економічної ефективності програм. Цей процес часто інтегрується з ERP-системами та аналітичними інструментами.

Управління персоналом передбачає: підбір і залучення викладацьких кадрів та адміністративного персоналу; оцінювання ефективності працівників; організацію підвищення кваліфікації; мотивацію та розвиток персоналу; управління кадровими даними. У підприємницьких закладах особлива увага приділяється залученню практиків із бізнесу.

Управління ризиками охоплює: ідентифікацію ризиків (фінансових, репутаційних, освітніх); аналіз ймовірності та впливу ризиків; розробку заходів мінімізації; моніторинг ризиків; реагування на кризові ситуації. Цей процес є критично важливим в умовах нестабільного середовища.

Підтримуючі процеси (support processes) – ці процеси не створюють освітній продукт безпосередньо, але забезпечують ефективне функціонування основних і управлінських процесів.

ІТ-підтримка включає: адміністрування інформаційних систем (LMS, CRM, ERP); технічну підтримку користувачів; забезпечення кібербезпеки; інтеграцію програмних рішень; розвиток цифрової інфраструктури [17-18]. Це критично важливий процес у контексті цифровізації освіти.

Маркетинг і просування охоплює: аналіз ринку освітніх послуг; формування бренду закладу; рекламні кампанії; роботу з соціальними мережами; залучення абітурієнтів і партнерів.

У підприємницьких закладах освіти маркетинг має стратегічне значення.

Адміністративне забезпечення передбачає: документообіг; організацію роботи офісу; юридичний супровід; забезпечення матеріально-технічної бази; координацію внутрішніх процесів.

Комунікації зі стейкхолдерами включають взаємодію із студентами, випускниками, роботодавцями, партнерами та державними органами. Цей процес забезпечує зворотний зв'язок, розвиток партнерства та підвищення репутації закладу.

Усі три групи бізнес-процесів тісно взаємопов'язані. Основні процеси створюють освітню цінність, управлінські визначають напрям розвитку, а підтримуючі забезпечують ресурсну та технологічну основу.

Їх ефективне функціонування можливе лише за умов: інтеграції в єдину інформаційну систему; використання сучасних ІТ-технологій; постійного аналізу та оптимізації. Саме така системна організація процесів є основою для формування конкурентоспроможного закладу освіти підприємницького типу.

Заклад освіти підприємницького типу функціонує як багаторівнева система, у якій всі процеси інтегровані в єдине інформаційне середовище. У табл. 1 наведено ієрархічну структуру бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу.

Таблиця 1

Ієрархічна структура бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу

Рівень управління	Тип процесів	Основні процеси	Зміст діяльності	Очікуваний результат	Особливості для підприємницького типу
Стратегічний	Стратегічні	Формування місії та бачення	Визначення напрямів розвитку закладу	Чітка стратегія розвитку	Орієнтація на ринок освітніх послуг
		Стратегічне планування	Аналіз середовища, постановка цілей	Довгострокові плани	Гнучкість і швидка адаптація
		Управління інноваціями	Впровадження нових освітніх продуктів	Інноваційні програми	Активна співпраця з бізнесом
		Управління портфелем програм	Формування освітніх продуктів	Конкурентоспроможні програми	Комерціалізація освіти
Тактичний	Управлінські	Управління освітніми програмами	Планування та координація навчання	Якісна організація освітнього процесу	Орієнтація на компетентності
		Фінансове планування	Бюджетування, контроль витрат	Ефективне використання ресурсів	Диверсифікація доходів
		Управління персоналом	Залучення, розвиток, оцінювання кадрів	Кваліфікований персонал	Залучення експертів-практиків
		Маркетинг і просування	Аналіз ринку, реклама	Залучення студентів	Освіта як продукт
Операційний	Операційні	Організація навчального процесу	Проведення занять, контроль відвідуваності	Реалізація освітніх послуг	Гнучкі формати навчання
		Оцінювання результатів	Контроль знань, аналіз успішності	Об'єктивна оцінка	Автоматизація та аналітика
		Адміністративні процеси	Документообіг, координація	Безперебійна робота закладу	Цифровізація процесів

Ієрархічний підхід дозволяє: узгодити стратегічні цілі з повсякденною діяльністю; забезпечити керованість і контроль процесів; інтегрувати всі рівні в єдину систему управління; підвищити ефективність прийняття рішень.

У закладах освіти підприємницького типу ця ієрархія має ключову особливість – високу динамічність, тобто швидкий перехід рішень зі стратегічного рівня до операційного через цифрові системи управління.

Заклади освіти підприємницького типу функціонують у принципово іншій парадигмі, ніж традиційні освітні установи. Вони не обмежуються виконанням суто освітньої функції, а

виступають як складні відкриті соціально-економічні системи, інтегровані в ринкове середовище. Це зумовлює багатовимірність їх діяльності та потребу в чіткій організації внутрішніх процесів.

Передусім, специфіка такого середовища визначається поєднанням різноманітних видів діяльності. У межах одного закладу одночасно реалізуються: освітні процеси (навчання, оцінювання, формування компетентностей); управлінські процеси (планування, контроль, координація ресурсів); комерційні процеси (просування освітніх послуг, взаємодія з ринком, залучення фінансування).

Ці процеси мають різну логіку, різні цілі та різні критерії ефективності, але при цьому повинні функціонувати узгоджено. Наприклад, рішення щодо відкриття нової освітньої програми одночасно впливає на навчальне навантаження викладачів, фінансове планування, маркетингову стратегію та взаємодію з роботодавцями. Без чіткої формалізації такі взаємозв'язки стають складними для управління.

Другим важливим аспектом є велика кількість учасників (стейкхолдерів), які беруть участь у процесах. До них належать: студенти як основні споживачі освітніх послуг; викладачі як носії знань і виконавці освітнього процесу; адміністративний персонал; роботодавці та бізнес-партнери; державні органи та акредитаційні інституції.

Кожна з цих груп має власні інтереси, очікування та вимоги. Відповідно, процеси повинні враховувати ці інтереси та забезпечувати ефективну взаємодію між усіма сторонами. У відсутності формалізованої моделі це призводить до інформаційних розривів, конфліктів і неефективності.

Наступною ключовою характеристикою є динамічність зовнішнього середовища. Ринок освітніх послуг швидко змінюється під впливом: технологічного розвитку; змін у потребах ринку праці; конкуренції між освітніми установами; глобалізаційних процесів.

Це означає, що заклад освіти повинен оперативного адаптувати свої програми, формати навчання та управлінські підходи. Без чітко описаних і структурованих процесів така адаптація стає хаотичною і неефективною.

Важливу роль відіграє також високий рівень цифровізації. У діяльності закладів освіти підприємницького типу активно використовуються різноманітні інформаційні системи: системи управління навчанням (LMS); системи управління взаємовідносинами з клієнтами (CRM); фінансові та ресурсні системи (ERP); аналітичні платформи (BI) [19, 20].

Хоча ці системи значно підвищують ефективність роботи, їх впровадження без єдиної процесної моделі часто призводить до фрагментації інформаційного простору. Дані можуть дублюватися, процеси не синхронізуються, а рішення приймаються на основі неповної інформації.

У результаті зазначених особливостей виникає низка типових проблем: незгодженість процесів, коли різні підрозділи діють незалежно, без чіткої координації; дублювання функцій, що призводить до зайвих витрат ресурсів; складність контролю, оскільки відсутня прозора структура процесів і відповідальності; низька прозорість діяльності, що ускладнює прийняття управлінських рішень та знижує довіру стейкхолдерів.

Усунення цих проблем можливе лише за умови переходу до процесно-орієнтованого підходу, ключовим елементом якого є формалізація бізнес-процесів.

Формалізована модель процесів виконує кілька критично важливих функцій. По-перше, вона чітко описує логіку діяльності: визначає послідовність дій, ролі учасників, інформаційні потоки та точки прийняття рішень. Це дозволяє структурувати складну діяльність і зробити її керованою.

По-друге, така модель забезпечує зрозумілість для всіх учасників процесу. Вона виступає універсальною мовою комунікації між управлінцями, викладачами та ІТ-фахівцями, що значно знижує ризик непорозуміння.

По-третє, формалізація створює основу для автоматизації. Чітко описані процеси можуть бути безпосередньо інтегровані в інформаційні системи, що дозволяє: автоматизувати рутинні операції; здійснювати моніторинг виконання процесів; використовувати аналітику для прийняття рішень.

Таким чином, специфіка середовища закладів освіти підприємницького типу – складність, динамічність, багатосуб'єктність та цифровізація – об'єктивно зумовлює необхідність формалізації бізнес-процесів. Саме вона виступає фундаментом для підвищення ефективності управління, забезпечення прозорості діяльності та реалізації стратегії цифрової трансформації.

Використання BPMN у моделюванні бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу є обґрунтованим як з методологічної, так і з практичної точки зору. Ця нотація забезпечує системний підхід до опису діяльності організації, дозволяючи поєднати управлінські, освітні та інформаційні аспекти в єдину узгоджену модель. Її застосування є особливо актуальним в умовах цифровізації та зростання складності освітніх систем.

BPMN (Business Process Model and Notation) є спеціалізованим стандартом, розробленим саме для опису бізнес-процесів незалежно від галузі їх застосування [21]. Її головна перевага полягає в тому, що вона дозволяє формалізувати діяльність організації у вигляді чітко структурованих процесів, які мають визначені входи, виходи, учасників і правила виконання. Завдяки використанню BPMN можливо: детально відобразити послідовність дій у межах будь-якого процесу – від простих операцій до складних багаторівневих процедур; візуалізувати взаємодію між учасниками через використання пулів (pools) та доріжок (lanes), що дозволяє чітко розмежувати відповідальність; врахувати альтернативні сценарії розвитку процесу за допомогою подій (events) і шлюзів (gateways), що особливо важливо для відображення варіативності; моделювати процеси різної складності, включаючи як локальні операції, так і міжорганізаційні взаємодії.

Для закладів освіти підприємницького типу така орієнтація є критично важливою. Освітній процес у цих установах не є лінійним – він включає множину етапів, таких як набір студентів, формування навчальних груп, організація навчання, оцінювання, зворотний зв'язок і супровід випускників. Кожен із цих етапів має власну логіку та може змінюватися залежно від зовнішніх умов.

Крім того, у таких процесах існує значна кількість точок прийняття рішень, наприклад: допуск студента до навчання; вибір індивідуальної освітньої траєкторії; оцінювання результатів; коригування навчальних програм.

Не менш важливою є взаємодія між підрозділами – навчальними, адміністративними, фінансовими та маркетинговими. BPMN дозволяє наочно показати ці взаємозв'язки, що забезпечує узгодженість діяльності всієї організації.

Однією з ключових переваг BPMN є її висока ступінь візуалізації, що робить її універсальним інструментом комунікації. На відміну від текстових описів або складних технічних моделей, BPMN-діаграми мають інтуїтивно зрозумілу графічну форму, яка легко сприймається навіть користувачами без спеціальної ІТ-підготовки. Це забезпечує: зрозумілість моделей для широкого кола користувачів, включаючи керівників, викладачів, адміністраторів та ІТ-фахівців; спрощення комунікації між підрозділами, оскільки всі учасники працюють із єдиною візуальною моделлю; зменшення ризику помилок і неправильного трактування, що часто виникає при використанні неформалізованих описів.

У контексті закладів освіти це має особливе значення, оскільки управлінські рішення часто приймаються особами, які не мають технічної освіти. BPMN дозволяє їм брати активну участь у процесі моделювання та оптимізації, що підвищує якість управління.

Ще одним важливим аргументом на користь використання BPMN є її потенціал як інструменту аналізу та оптимізації бізнес-процесів. Побудова процесної моделі дозволяє

перейти від інтуїтивного управління до обґрунтованого, заснованого на даних і структурованому аналізу.

Зокрема, BPMN дає можливість: виявляти «вузькі місця» у процесах, де виникають затримки або перевантаження; аналізувати дублювання функцій, що призводить до неефективного використання ресурсів; усувати зайві або нецінні етапи, які не створюють доданої вартості; підвищувати загальну ефективність процесів шляхом їх реорганізації.

У практичній діяльності закладів освіти це може проявлятися у: оптимізації процедури зарахування студентів (скорочення часу обробки заяв, автоматизація перевірок); вдосконаленні системи оцінювання (використання автоматизованих тестових систем); скороченні часу погодження документів (впровадження електронного документообігу). Таким чином, BPMN виступає не лише інструментом опису, але й засобом постійного вдосконалення діяльності.

Однією з найважливіших характеристик BPMN є її здатність виступати основою для автоматизації бізнес-процесів. На відміну від багатьох інших нотацій, BPMN тісно інтегрована з сучасними BPM-системами (Business Process Management Systems), що дозволяє безпосередньо реалізовувати змодельовані процеси у програмному середовищі [22].

Сучасні технології забезпечують можливість: виконання процесів на основі BPMN-моделей, тобто автоматичного запуску та контролю їх виконання; інтеграції з іншими інформаційними системами (LMS, CRM, ERP), що створює єдине цифрове середовище; моніторингу процесів у реальному часі, включаючи відстеження статусу, продуктивності та відхилень [23]. Це дозволяє перейти від статичного опису процесів до їх динамічного управління. У результаті BPMN виконує роль своєрідного мосту між: описом процесу (концептуальний рівень); його реалізацією (технічний рівень); автоматизацією та контролем (операційний рівень).

Отже, доцільність використання BPMN у закладах освіти підприємницького типу зумовлена її здатністю: адекватно відображати складні та варіативні бізнес-процеси; забезпечувати зрозумілу візуалізацію діяльності; виступати інструментом аналізу та оптимізації; бути основою для цифровізації та автоматизації управління. Саме ці властивості роблять BPMN ефективним інструментом трансформації традиційних освітніх установ у сучасні, гнучкі та конкурентоспроможні організації підприємницького типу.

UML (Unified Modeling Language) є універсальною мовою моделювання, що використовується для проектування складних програмних систем. Її основне призначення – формалізувати структуру, поведінку та взаємодію компонентів інформаційних систем [23].

У контексті закладів освіти підприємницького типу це має особливе значення, оскільки їх діяльність базується на інтеграції різних цифрових платформ. UML дозволяє:

- створити цілісну архітектуру інформаційної системи, яка охоплює всі ключові підсистеми (управління навчанням, фінанси, взаємодія зі студентами);
- визначити структуру даних, що циркулюють у системі (студенти, курси, результати навчання, фінансові показники);
- описати взаємодію між модулями, такими як LMS (Learning Management System), CRM (Customer Relationship Management), ERP (Enterprise Resource Planning).

Це особливо важливо, оскільки без чіткої архітектурної моделі виникають проблеми: дублювання даних у різних системах; відсутність синхронізації; складність інтеграції нових рішень. Таким чином, UML забезпечує системність і узгодженість цифрової інфраструктури закладу.

Однією з ключових переваг UML є можливість багаторівневого опису системи – від загальної концепції до конкретної реалізації. Це досягається завдяки використанню різних типів діаграм, кожна з яких виконує окрему функцію.

Діаграми варіантів використання (Use Case) дозволяють: визначити, які функції система повинна виконувати; описати взаємодію користувачів (студентів, викладачів, адміністраторів) із системою; сформувавши вимоги до програмного забезпечення.

Діаграми класів описують структуру даних і їх взаємозв'язки; формують основу для розробки баз даних; забезпечують логічну цілісність системи.

Діаграми послідовностей відображають динаміку взаємодії між компонентами; показують порядок виконання операцій; дозволяють моделювати сценарії роботи системи в часі.

Діаграми діяльності деталізують бізнес-процеси на рівні виконання; відображають логіку переходів між станами; часто використовуються як міст між BPMN і програмною реалізацією.

Завдяки такій різноманітності UML дозволяє поступово переходити: від загального опису процесу до детального проектування та програмної реалізації. Це особливо важливо для складних освітніх систем, де одна і та ж функція (наприклад, оцінювання) включає різні сценарії та взаємодії.

UML є міжнародно визнаним стандартом у сфері розробки програмного забезпечення, що забезпечує низку важливих переваг. По-перше, це уніфікованість підходів. Використання UML дозволяє різним командам (аналітикам, розробникам, тестувальникам) працювати в єдиному концептуальному просторі. Це зменшує кількість помилок і спрощує комунікацію.

По-друге, UML підтримує командну розробку. Завдяки стандартизованим діаграмам: різні фахівці можуть працювати над окремими частинами системи; забезпечується узгодженість результатів; спрощується передача знань між учасниками проекту.

По-третє, UML забезпечує сумісність з сучасними інструментами розробки. Більшість CASE-засобів (Computer-Aided Software Engineering) підтримують: створення UML-діаграм; автоматичну генерацію коду; зворотне проектування (reverse engineering). Це значно прискорює процес розробки та підвищує якість програмного забезпечення.

По-четверте, UML сприяє зменшенню помилок на ранніх етапах. Завдяки детальному моделюванню: виявляються логічні суперечності; уточнюються вимоги; усуваються потенційні проблеми ще до етапу програмування.

Доцільність використання UML у моделюванні бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу полягає в тому, що він: забезпечує формалізацію архітектури інформаційних систем; дозволяє деталізувати функціонал і структуру даних; підтримує повний життєвий цикл розробки програмного забезпечення; сприяє інтеграції різних цифрових платформ.

У поєднанні з BPMN UML створює повноцінну основу для цифрової трансформації закладу освіти, забезпечуючи зв'язок між бізнес-процесами та їх технічною реалізацією. Саме це дозволяє досягти високого рівня ефективності, гнучкості та конкурентоспроможності в сучасному освітньому середовищі.

У сучасних умовах цифровізації освітніх установ жодна нотація моделювання не є достатньою для повного опису складної системи управління закладом освіти підприємницького типу. BPMN і UML виконують різні, але взаємодоповнювальні функції. Їх синергія дозволяє перейти від фрагментарного опису процесів до створення цілісної цифрової моделі організації, яка поєднує бізнес-логіку та ІТ-реалізацію [24].

Окреме використання кожної з нотацій має свої обмеження. BPMN, хоча й ефективно описує бізнес-процеси, не розкриває технічну сторону їх реалізації в інформаційних системах. UML, навпаки, глибоко деталізує програмну архітектуру, але не завжди відображає бізнес-контекст і логіку процесів у зрозумілій для менеджменту формі. Саме тому їх комбіноване використання є найбільш доцільним і науково обґрунтованим підходом.

У межах комплексного підходу до моделювання бізнес-процесів доцільно чітко розмежувати функціональне призначення кожної нотації (табл. 2). Це дозволяє уникнути дублювання та підвищує ефективність моделювання.

Таблиця 2

Функціональне призначення нотацій

Нотація	Основне призначення	Рівень абстракції	Фокус уваги
BPMN	Моделювання бізнес-процесів	Бізнес-рівень	Логіка процесів, ролі, послідовність дій
UML	Проектування інформаційних систем	Технічний рівень	Архітектура систем, дані, взаємодія компонентів

Таким чином, BPMN відповідає на питання «що відбувається в організації», тоді як UML – на питання «як це реалізується в інформаційній системі».

У контексті закладів освіти підприємницького типу це розмежування є критично важливим, оскільки: управлінці працюють із бізнес-процесами; IT-фахівці з програмною реалізацією; адміністрація з організаційною структурою.

Ефективна цифрова трансформація закладу освіти передбачає поетапне використання обох нотацій у логічній послідовності.

Етап 1 – моделювання бізнес-процесу (BPMN). На цьому етапі описується сам процес у його організаційній сутності. Наприклад, процес «зарахування студента» включає: подання заявки; перевірку документів; прийняття рішення; зарахування до групи.

BPMN дозволяє: визначити учасників процесу (абітурієнт, приймальна комісія, адміністрація); показати послідовність дій; врахувати альтернативні сценарії (відмова, доопрацювання документів); зафіксувати точки прийняття рішень.

Етап 2 – деталізація інформаційної системи (UML). Після формалізації бізнес-процесу здійснюється його технічна деталізація за допомогою UML. На цьому етапі визначається: які інформаційні системи залучені (наприклад, LMS, CRM, ERP); які дані обробляються (дані студента, заявка, результати перевірки); як відбувається взаємодія між компонентами системи.

Для цього використовуються: діаграми варіантів використання для визначення функціональних вимог; діаграми класів для структури даних; діаграми послідовностей для опису взаємодії систем; діаграми діяльності для деталізації алгоритмів.

Етап 3 – узгодження моделей. На цьому етапі здійснюється узгодження BPMN- та UML-моделей для забезпечення: відповідності бізнес-логіки технічній реалізації; усунення суперечностей; цілісності системи.

Поєднання BPMN і UML дозволяє сформувати інтегровану модель, яка охоплює як бізнес, так і IT-рівень функціонування закладу освіти. Основні результати такої інтеграції:

1. Повна картина діяльності закладу BPMN забезпечує розуміння процесів, а UML – їх технічну реалізацію. Разом вони формують цілісну модель організації.

2. Узгоджена архітектура інформаційних систем UML дозволяє спроектувати єдину цифрову екосистему, де всі модулі (LMS, CRM, ERP) працюють синхронізовано з бізнес-процесами, описаними в BPMN.

3. Усунення розриву між бізнесом і IT. Однією з ключових проблем сучасних організацій є невідповідність між вимогами бізнесу та реалізацією IT-систем. Синергія BPMN і UML усуває цей розрив.

4. Основа для цифрової трансформації. Інтегрована модель стає фундаментом для: автоматизації процесів; впровадження BPM-систем; розвитку data-driven управління; створення цифрового університету

Синергія BPMN та UML у моделюванні бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу є ключовим методологічним підходом, що забезпечує зв'язок між управлінською логікою та технічною реалізацією.

Якщо BPMN дозволяє побачити організацію як систему процесів, то UML перетворює цю систему на конкретну інформаційну архітектуру. Їх спільне використання створює основу для побудови сучасних, гнучких і повністю цифровізованих освітніх установ, здатних ефективно функціонувати в умовах ринку знань.

Розглянемо доцільність використання BPMN та UML для моделювання бізнес-процесів закладів освіти підприємницького типу обумовлена їх здатністю забезпечити: комплексне представлення діяльності; зв'язок між бізнесом і ІТ; основу для автоматизації; підтримку прийняття управлінських рішень. У табл. 3 наведено переваги використання BPMN та UML для закладів освіти підприємницького типу.

Таблиця 3

Переваги використання BPMN та UML для закладів освіти підприємницького типу

Група переваг	Зміст переваг	Характеристика впливу на заклад освіти підприємницького типу
Організаційні переваги	Прозорість процесів	Забезпечує чітке відображення всіх бізнес-процесів, що дозволяє керівництву бачити реальну картину діяльності закладу та контролювати виконання завдань
	Чіткий розподіл відповідальності	Визначення ролей учасників процесів (викладачі, адміністрація, студенти) зменшує дублювання функцій і підвищує дисципліну виконання
	Покращення управління	Систематизація процесів сприяє більш ефективному прийняттю управлінських рішень на основі структурованих даних
Економічні переваги	Зниження витрат	Оптимізація процесів дозволяє зменшити витрати часу, людських ресурсів та фінансів
	Оптимізація ресурсів	Раціональне використання матеріальних, кадрових та інформаційних ресурсів закладу
	Підвищення ефективності	Зростання продуктивності освітніх та управлінських процесів без додаткового збільшення витрат
Технологічні переваги	Автоматизація процесів	Можливість реалізації процесів у BPM-системах та інформаційних платформах на основі моделей BPMN та UML
	Інтеграція систем	Об'єднання LMS, CRM, ERP та інших систем у єдину цифрову екосистему
	Підтримка цифровізації	Формування основи для цифрової трансформації освітнього середовища
Стратегічні переваги	Швидка адаптація до змін	Гнучкість моделей дозволяє оперативно змінювати процеси відповідно до вимог ринку
	Підвищення конкурентоспроможності	Ефективне управління та цифровізація підсилюють позиції закладу на ринку освітніх послуг

Представлена система переваг використання BPMN та UML у закладах освіти підприємницького типу демонструє їх комплексний вплив на всі ключові аспекти діяльності організації. Зокрема, організаційні переваги забезпечують структурованість і прозорість управління; економічні сприяють раціональному використанню ресурсів та підвищенню ефективності; технологічні формують основу для автоматизації та цифрової інтеграції, а

стратегічні визначають довгострокову конкурентоспроможність і інноваційний розвиток закладу.

Таким чином, використання BPMN та UML не обмежується лише моделюванням процесів, а виступає інструментом комплексної трансформації освітньої установи в сучасну, гнучку та цифровоорієнтовану систему управління, здатну ефективно функціонувати в умовах динамічного ринку освітніх послуг.

Розробка узагальненої моделі бізнес-процесів є ключовим етапом системного аналізу діяльності закладу освіти підприємницького типу, оскільки дозволяє формалізувати всі рівні управління, освітні та допоміжні функції в єдину структуровану систему. Така модель виступає основою для подальшої цифровізації, автоматизації та оптимізації управлінських рішень.

На рис. 1 представлено матрицю цифрової інтеграції інформаційних систем і бізнес-процесів.



Рис. 1. Матриця цифрової інтеграції інформаційних систем і бізнес-процесів закладу освіти підприємницького типу

Рис. 1 відображає інтенсивність взаємодії між інформаційними системами LMS, CRM, ERP, BI та ключовими блоками бізнес-процесів закладу освіти. Найвищі значення інтеграції спостерігаються в тих зонах, де цифрові сервіси безпосередньо підтримують управління освітньою діяльністю та прийняття рішень. Матриця дозволяє ідентифікувати сильні сторони цифрової інфраструктури, а також напрями, де взаємодія систем залишається фрагментарною. Отримані оцінки можуть бути використані для пріоритизації IT-інвестицій, планування інтеграційних робіт і підвищення загальної процесної узгодженості.

На рис. 2 представлено послідовність етапів у процесі моделювання та розробки програмних систем:

1. BPMN-рівень (логіка процесів). На цьому етапі описується бізнес-логіка у вигляді процесів. Використання BPMN дозволяє формалізувати послідовність дій, ролі учасників та взаємодію між ними.

2. UML-рівень (інформаційна модель). Наступний крок – перехід від процесної логіки до інформаційної моделі. UML-діаграми відображають структуру системи: класи, атрибути, зв'язки та взаємодії між компонентами.

3. Програмна реалізація. Завершальний етап – трансформація інформаційної моделі у програмний код. Тут відбувається технічна реалізація системи, що забезпечує виконання визначених бізнес-процесів.

Повний цикл трансформації моделі

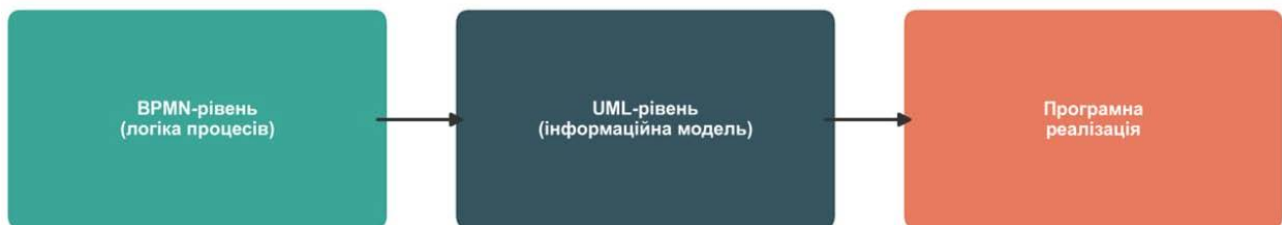


Рис. 2. Повний цикл трансформації моделі

Рис. 2 ілюструє повний цикл переходу від концептуального опису процесів до їхньої програмної реалізації, підкреслюючи модельно-орієнтований підхід у розробці програмного забезпечення.

Безперервний цикл функціонування узагальненої моделі представлений на рис. 3 відображає замкнений процес, який складається з шести послідовних етапів, що утворюють циклічну систему управління та вдосконалення діяльності:

1. Планування програми (синій блок). Початковий етап, де визначаються стратегічні цілі, напрями розвитку та ресурси, необхідні для реалізації програми.

2. Аналіз ринку (бірюзовий блок). На цьому етапі здійснюється дослідження зовнішнього середовища: вивчення потреб, конкурентів, тенденцій та можливостей для ефективного функціонування.

3. Коригування рішень (зелений блок). Враховуючи результати аналізу, відбувається уточнення та адаптація прийнятих рішень, щоб вони відповідали актуальним умовам.

4. Аналітика ефективності (темно-бірюзовий блок). Здійснюється оцінка продуктивності та результативності реалізованих заходів, використання інструментів аналітики для вимірювання ефективності.

5. Оцінювання результатів (помаранчевий блок). Проводиться підсумкове оцінювання досягнутих результатів, визначаються сильні та слабкі сторони, а також можливості для вдосконалення.

6. Реалізація напрямків (червоний блок). Завершальний етап, де ухвалені рішення втілюються у практичну діяльність. Він водночас є стартом нового циклу, адже після реалізації знову починається планування.

Рис. 3 ілюструє замкнений процес постійного вдосконалення, де кожен етап логічно переходить у наступний, забезпечуючи безперервність управління та розвиток системи.

Розроблена узагальнена модель бізнес-процесів дозволяє розглядати заклад освіти підприємницького типу як єдину інтегровану систему, в якій освітні, управлінські, підтримуючі та ринкові процеси функціонують у тісній взаємодії. Такий підхід створює

основу для цифрової трансформації, підвищення ефективності управління та формування конкурентоспроможної освітньої організації нового типу.

Безперервний цикл функціонування узагальненої моделі

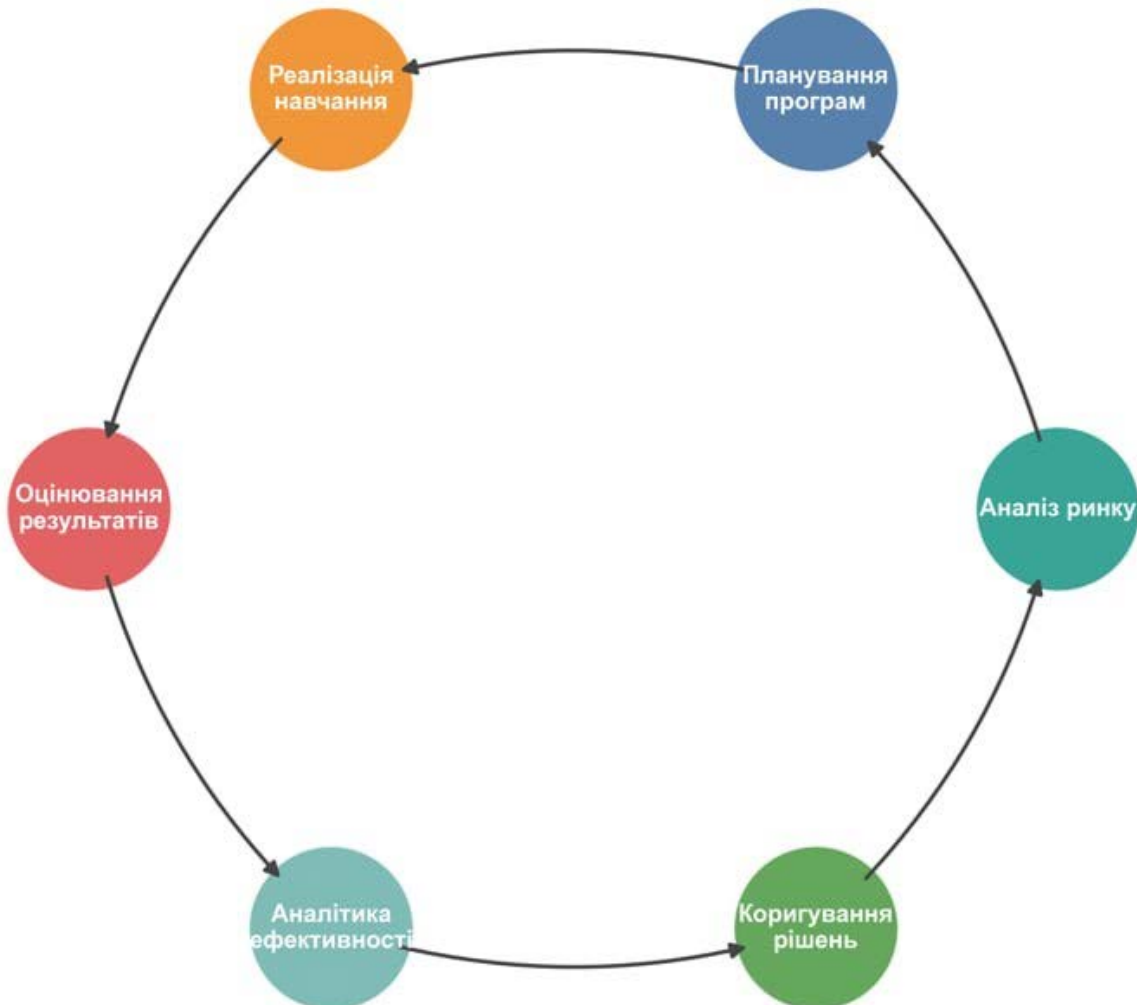


Рис. 3. Безперервний цикл функціонування узагальненої моделі бізнес-процесів закладу освіти підприємницького типу

Розробка концепції інтеграції інформаційних систем є ключовим етапом цифрової трансформації закладу освіти підприємницького типу, оскільки дозволяє об'єднати розрізнені бізнес-процеси в єдину керовану цифрову екосистему. Такий підхід забезпечує автоматизацію управлінських рішень, підвищення прозорості діяльності та оперативність реагування на зміни зовнішнього середовища.

Запропонована концепція базується на створенні єдиного інтегрованого інформаційного середовища (Integrated Educational Information Ecosystem), у якому всі підсистеми взаємодіють через централізовану платформу обміну даними. Основна ідея полягає у переході від фрагментованих ІТ-систем до єдиної цифрової архітектури управління закладом освіти.

На рис. 4 представлено трирівневу архітектуру системи управління освітнім процесом, яка забезпечує комплексну автоматизацію та інтеграцію всіх учасників освітнього середовища:

1. Рівень користувачів (Front-End Layer). На цьому рівні відображені основні учасники освітнього процесу: студенти, викладачі, адміністрація, роботодавці та абітурієнти. Вони

отримують доступ до функцій системи, таких як подання заявок, доступ до навчальних матеріалів, комунікація, оцінювання та взаємодія.

2. Рівень бізнес-процесів (Process Layer). Тут реалізуються ключові бізнес-процеси, що підтримують освітню діяльність: зарахування студентів, формування навчальних матеріалів, управління розкладом, оцінювання знань, фінансові операції, маркетингові та соціальні активності. Використання BPMN-моделей забезпечує прозорість, стандартизацію та автоматизацію процесів.

3. Рівень даних та інтеграції (Data & Integration Layer). Цей рівень відповідає за роботу з даними та їх інтеграцію. Він включає API-шлюзи, інтеграційну шину (ESB), централізоване сховище даних, ETL-процеси та джерела даних (внутрішні й зовнішні). Додатково реалізовано моніторинг даних, управління метаданими та візуалізацію потоків даних.

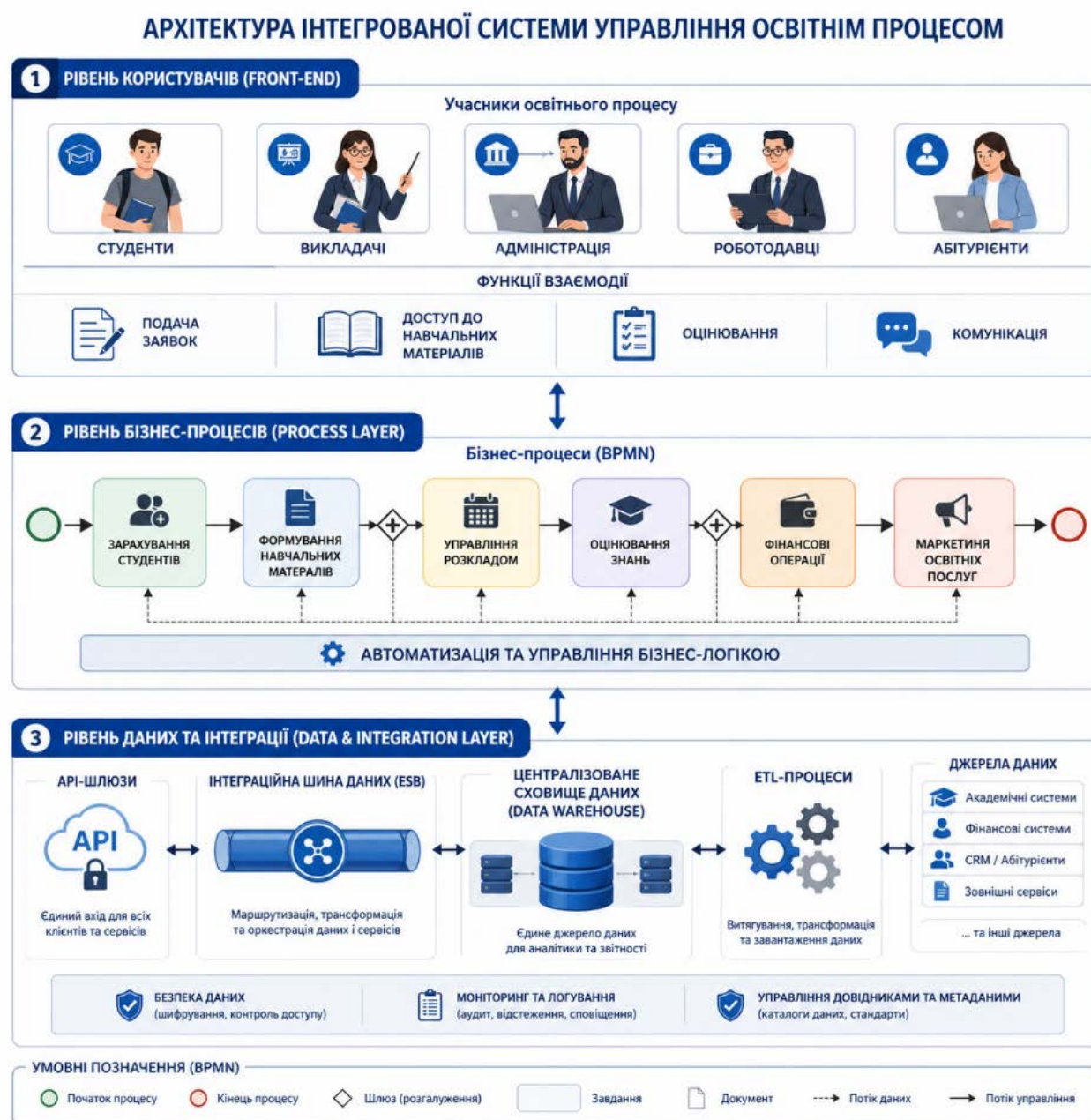


Рис. 4. Трирівнева архітектура системи управління освітнім процесом

Запропонована система поєднує користувачів, бізнес-логіку та дані в єдиній інтегрованій архітектурі, що дозволяє ефективно управляти освітнім процесом, підвищувати його прозорість та якість.

Висновки. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано, що заклади освіти підприємницького типу функціонують як складні відкриті соціально-економічні системи, діяльність яких поєднує освітні, управлінські та комерційні компоненти. Така багатовимірність, а також висока динамічність зовнішнього середовища та значна кількість стейкхолдерів зумовлюють необхідність застосування процесно-орієнтованого підходу до управління.

Визначено та систематизовано три ключові групи бізнес-процесів: основні, управлінські та підтримуючі. Показано, що основні процеси формують освітню цінність, управлінські забезпечують стратегічний розвиток і координацію діяльності, а підтримуючі створюють ресурсну та технологічну основу функціонування. Доведено їх тісну взаємозалежність та необхідність інтеграції в єдину систему управління.

Запропоновано ієрархічну модель бізнес-процесів (стратегічний, тактичний, операційний рівні), яка забезпечує узгодженість між довгостроковими цілями та операційною діяльністю закладу. Встановлено, що для закладів освіти підприємницького типу характерною є висока динамічність цієї ієрархії, що реалізується через цифрові системи управління.

Обґрунтовано доцільність використання нотації BPMN як ефективного інструменту формалізації, візуалізації та оптимізації бізнес-процесів. Показано, що BPMN дозволяє не лише описувати діяльність організації, але й виступає основою для автоматизації процесів у середовищах BPMS, забезпечуючи перехід до динамічного управління процесами в реальному часі.

Доведено, що UML є необхідним інструментом для проєктування інформаційної архітектури закладу освіти, оскільки дозволяє формалізувати структуру даних, логіку взаємодії компонентів та забезпечити інтеграцію різних інформаційних систем (LMS, CRM, ERP, BI). Визначено, що UML доповнює BPMN, забезпечуючи технічну реалізацію бізнес-процесів.

Розкрито синергетичний ефект поєднання BPMN та UML, який полягає у забезпеченні цілісного підходу до моделювання: від опису бізнес-логіки до її програмної реалізації. Такий підхід дозволяє усунути розрив між управлінськими вимогами та ІТ-рішеннями, що є критично важливим для цифрової трансформації.

Розроблено узагальнену модель бізнес-процесів закладу освіти підприємницького типу, яка інтегрує всі рівні управління та види діяльності в єдину систему. Запропоновано концепцію єдиного інтегрованого інформаційного середовища, що базується на взаємодії LMS, CRM, ERP та BI-систем через інтеграційні механізми.

Запропонована трирівнева архітектура (Front-end, Process Layer, Data & Integration Layer) забезпечує комплексну автоматизацію освітнього процесу, прозорість управління та ефективну взаємодію між усіма учасниками освітнього середовища.

Формалізація та інтеграція бізнес-процесів на основі BPMN і UML є ключовою передумовою побудови сучасного закладу освіти підприємницького типу. Реалізація запропонованого підходу дозволяє підвищити ефективність управління, забезпечити прозорість діяльності, оптимізувати використання ресурсів та сформуванню конкурентоспроможну, гнучку й цифровоорієнтовану освітню організацію.

References

Література

- | | |
|--|--|
| <p>1. Ministry of Digital Transformation of Ukraine. URL: https://thedigital.gov.ua [in Ukrainian].</p> <p>2. Pro Tsili staloho rozvytku Ukrainy na period do 2030 roku: Ukaz Prezydenta Ukrainy [On Ukraine's Sustainable</p> | <p>1. Міністерство цифрової трансформації України. URL: https://thedigital.gov.ua.</p> <p>2. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року: Указ Президента</p> |
|--|--|

- Development Goals for the Period up to 2030: Decree of the President of Ukraine]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> [in Ukrainian].
3. Goloborodko, T. V., & Mishchuk, E. V. (2023). Lideraska skladova tsyfrovyykh transformatsii: vyklyky ta mozhlyvosti u konteksti yevropeiskoi intehratsii [The Leadership Component of Digital Transformations: Challenges and Opportunities in the Context of European Integration]. *Publichne upravlinnia i administruvannia v Ukraini – Public management and administration in Ukraine*, (34), 7–14 [in Ukrainian].
4. Rudenko, I. S. (2025). Tsyfrova transformatsiia publichnoho upravlinnia: komunikatsiini mekhanizmy, etychni vyklyky ta normatyvne rehuliuвання [Digital Transformation of Public Administration: Communication Mechanisms, Ethical Challenges, and Regulatory Framework]. *Suchasnyi naukovyi zhurnal – Modern Scientific Journal*, 7(1), 59–69. DOI: <https://doi.org/10.36994/2786-9008-2025-7-7> [in Ukrainian].
5. Skidan, V. V., Demkivska, T. I., Volivach, A. P., & Chuprynka, N. V. (2025). Modeliuvannia ryzykiv suchasnoho osvithnoho protsesu z vykorystanniam modelei heteroskedastychnosti [Modeling the risks of the modern educational process using heteroscedasticity models]. *Visnyk KhNU – Bulletin of Kharkiv National University*, 355(4), 113–119. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-49> [in Ukrainian].
6. Kopp, A., & Orlovskiy, D. (2020). Intelligent Support of the Business Process Model Analysis and Improvement Method. *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications (ICTERI 2019). Communications in Computer and Information Science* (vol. 1175, pp. 111–135). V. Ermolayev et al. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG.
7. Buyak, L., Pryshlyak, K., & Semenko, Y. (2025). Rol modeliuvannia biznes-protsesiv v upravlinni ryzykamy [The Role of Business Process Modeling in Risk Management]. *Modeling the Development of Economic Systems*, (3), 137–143. DOI: <https://doi.org/10.31891/mdes/2025-17-19> [in Ukrainian].
8. Danchenko, O. B., & Semko, O. V. (2023). Rozrobka protyryzkovoho metodu optymizatsii biznes-protsesiv [Development of an anti-risk method for business process optimization]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program, and Project Management*, (1), 27–34 [in Ukrainian].
9. Kremen, V. et al. (2024). Osvita dlia tsyfrovoy transformatsii suspilstva [Education for the Digital Transformation of Society] / Edukacja dla cyfrowej transformacji społeczeństwa / Education for digital transformation of society: monograph. In 2 vols. Vol. 1.
- України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>.
3. Голобородько Т. В., Міщук Є. В. Лідерська складова цифрових трансформацій: виклики та можливості у контексті європейської інтеграції. *Публічне управління і адміністрування в Україні*. 2023. № 34. С. 7–14.
4. Руденко І. С. Цифрова трансформація публічного управління: комунікаційні механізми, етичні виклики та нормативне регулювання. *Сучасний науковий журнал*. 2025. № 7(1). С. 59–69. DOI: <https://doi.org/10.36994/2786-9008-2025-7-7>.
5. Скідан В. В., Демківська Т. І., Волівач А. П., Чупринка Н. В. Моделювання ризиків сучасного освітнього процесу з використанням моделей гетероскедастичності. *Вісник ХНУ*. 2025. Том 355, № 4. С. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-49>.
6. Kopp A., Orlovskiy D. Intelligent Support of the Business Process Model Analysis and Improvement Method. *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications (ICTERI 2019). Communications in Computer and Information Science*. V. Ermolayev et al. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2020. Vol. 1175. P. 111–135.
7. Буюк Л., Пришляк К., Семененко Ю. Роль моделювання бізнес-процесів в управлінні ризиками. *Modeling the development of the economic systems*. 2025. No. 3. С. 137–143. DOI: <https://doi.org/10.31891/mdes/2025-17-19>.
8. Данченко О. Б., Семко О. В. Розробка протиризикового методу оптимізації бізнес-процесів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. 2023. No. 1. С. 27–34.
9. Освіта для цифрової трансформації суспільства / Edukacja dla cyfrowej transformacji społeczeństwa / Education for digital transformation of society: монографія: у 2 т. Т. 1. За наук. ред. В. Кременя,

Edited by V. Kremen, N. Nychkalo, L. Lukyanova, N. Lazarenko. Kyiv: Yurka Lyubchenko LLC. 526 p. [in Ukrainian].

10. Pedrada (2023). Tsyfrovizatsiia ukrainskoi osvity: realizatsiia, problemy i perspektyvy [Digitalization of Ukrainian Education: Implementation, Problems, and Prospects]. URL: <https://oplatforma.com.ua/article/16004-tsifrovizatsiya-ukrainskoi-osviti-realizatsiya-problemi-i-perspektivi> [in Ukrainian].

11. Digital transformation skills (2023). Powerful Ways Digital Transformation In Education Empower Educators. URL: <https://digitaltransformationskills.com/digital-transformation-in-education/>

12. Areshonkov, V. Yu. (2020). Tsyfrovizatsiia vyshchoi osvity: vyklyky ta vidpovidy [The Digitalization of Higher Education: Challenges and Responses: Research paper presented at the methodological seminar of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine "Ways and Mechanisms for Enhancing the Competitiveness of Ukrainian Universities", Nov. 19, 2020]. *Bulletin of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine*, 2(2), 1–6. DOI: <https://doi.org/10.37472/2707-305X-2020-2-2-13-2> [in Ukrainian].

13. Vasilyeva, T. A. et al. (2022). Tsyfrovі tekhnolohii v osviti: suchasnyi dosvid, problemy ta perspektyvy: monohrafiia [Digital Technologies in Education: Contemporary Experience, Problems, and Prospects: monograph]. Edited by T. A. Vasilyeva, Yu. M. Petrusenko. Sumy: Sumy State University. 150 p. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/89990> [in Ukrainian].

14. Feola, R., Parente, R., & Cucino, V. (2021). The Entrepreneurial University: How to Develop the Entrepreneurial Orientation of Academia. *Journal of the Knowledge Economy*, (12), 1787–1808 DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-020-00675-9>.

15. Wang, Y., & Ma, Y. (2022). Innovation and Entrepreneurship Education in Universities: Developments and Challenges. *Chinese Education & Society*, 2022, 225–232. DOI: <https://doi.org/10.1080/10611932.2022.2136446>.

16. Weske, M. (2019). Business Process Management. Concepts, Languages, Architectures. Springer Berlin, Heidelberg, 22 June 2019. 419 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59432-2>.

17. Laudon, K. C., & Laudon, J. P. (2020). Management Information Systems: Managing the Digital Firm. 16th ed. Pearson. 669 p.

18. Turnbull, D., Chugh, R., & Luck, J. (2021). Learning Management Systems: An Overview. In: *Encyclopedia*

Н. Ничкало, Л. Лук'янової, Н. Лазаренко. Київ: ТОВ "Юрка Любченка", 2024. 526 с.

10. Цифровізація української освіти: реалізація, проблеми і перспективи. *Педрада*. 2023. URL: <https://oplatforma.com.ua/article/16004-tsifrovizatsiya-ukrainskoi-osviti-realizatsiya-problemi-i-perspektivi>.

11. Powerful Ways Digital Transformation In Education Empower Educators. *Digital transformation skills*. 2023. URL: <https://digitaltransformationskills.com/digital-transformation-in-education/>

12. Арешонков В. Ю. Цифровізація вищої освіти: виклики та відповіді: Наукова доповідь на методологічному семінарі НАПН України "Шляхи і механізми підвищення конкурентоспроможності університетів України", 19 листоп. 2020 р. *Вісник Національної академії педагогічних наук України*. 2020. Т. 2, № 2. С. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.37472/2707-305X-2020-2-2-13-2>.

13. Цифрові технології в освіті: сучасний досвід, проблеми та перспективи: монографія / за заг. Т. А. Васильєвої, Ю. М. Петрушенка. Суми: Сумський державний університет, 2022. 150 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/89990>.

14. Feola R., Parente R., Cucino V. The Entrepreneurial University: How to Develop the Entrepreneurial Orientation of Academia. *Journal of the Knowledge Economy*. 2021. No. 12. P. 1787–1808 DOI: <https://doi.org/10.1007/s13132-020-00675-9>.

15. Wang Y., Ma Y. Innovation and Entrepreneurship Education in Universities: Developments and Challenges. *Chinese Education & Society*. 2022. P. 225–232. DOI: <https://doi.org/10.1080/10611932.2022.2136446>.

16. Weske M. Business Process Management. Concepts, Languages, Architectures. Springer Berlin, Heidelberg, 2019. 419 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59432-2>.

17. Laudon K. C., Laudon J. P. Management Information Systems: Managing the Digital Firm. 16th ed. Pearson, 2020. 669 p.

18. Turnbull D., Chugh R., Luck J. Learning Management Systems: An Overview.

- of Education and Information Technologies (pp. 1052–1058).
19. Rejeb, A. et al. (2022). Entrepreneurial Education at Universities: A Bibliometric Analysis. *Administrative Sciences*, 12(4).
20. Freund, J., & Rücker, B. (2020). Real-Life BPMN: Using BPMN 2.0 to Analyze, Improve, and Automate Processes in Your Company. 2nd ed. O'Reilly. 390 p.
21. Pourshahid, A. et al. (2021). Toward a Goal-Oriented Framework for Business Process Management Systems. *IEEE Access*, (9), 120012–120025.
22. Sharda, R., Delen, D., & Turban, E. (2018). Business Intelligence, Analytics, and Data Science: A Managerial Perspective. 4th ed. Pearson. 560 p.
23. Gudzovata, O. O., Kostyrko, V. I., & Artyschuk, I. V. (2019). Vykorystannia unifikovanoi movy vizualnoho modeliuвання UML (unified modeling language) yak instrumentu pidtrymky proektuvannya informatsiinykh system [The Use of the Unified Modeling Language (UML) as a Tool for Supporting the Design of Information Systems]. *Pidpriemnytstvo i torhivlia –Entrepreneurship and Trade*, (24), 108–114. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1256-2019-24-16> [in Ukrainian].
24. Pistunov, I. M. (2021). Modeliuвання biznes protsesiv: navchalnyi posibnyk [Business Process Modeling: textbook]. D.: NTU "DP". 130 p. URL: http://pistunovi.inf.ua/MOD_BIZ_IPOU.pdf [in Ukrainian].
- Encyclopedia of Education and Information Technologies*. 2021. P. 1052–1058.
19. Rejeb A. et al. Entrepreneurial Education at Universities: A Bibliometric Analysis. *Administrative Sciences*. 2022. Vol. 12(4).
20. Freund J., Rücker B. Real-Life BPMN: Using BPMN 2.0 to Analyze, Improve, and Automate Processes in Your Company. 2nd ed. O'Reilly, 2020. 390 p.
21. Pourshahid A. et al. Toward a Goal-Oriented Framework for Business Process Management Systems. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 120012–120025.
22. Sharda R., Delen D., Turban E. Business Intelligence, Analytics, and Data Science: A Managerial Perspective. 4th ed. Pearson, 2018. 560 p.
23. Гудзовата О. О., Костирко В. І., Артищук І. В. Використання уніфікованої мови візуального моделювання UML (unified modeling language) як інструменту підтримки проектування інформаційних систем. *Підприємництво і торгівля*. 2019. Вип. 24. С. 108–114. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1256-2019-24-16>.
24. Пістунів І. М. Моделювання бізнес процесів: навчальний посібник. Д.: НТУ "ДП", 2021. 130 с. URL: http://pistunovi.inf.ua/MOD_BIZ_IPOU.pdf.

SKIDAN VLADYSLAVA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Information
and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8358-9759>
Scopus Author ID: 57210393405
E-mail: skidan.vv@knutd.edu.ua

AFTANDILYANTS VADYM

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
Department of Information and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0660-1395>
ResearcherID: Q-3511-2016
E-mail: aftandilyants@gmail.com

MYTELSKA OLENA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Information and Computer Technologies,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-4147-0866>
E-mail: mytelska.ov@knutd.edu.ua

FILIMONOV DMITRY

Postgraduate,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

Vladyslava SKIDAN, Olena MYTELSKA,
Vadym AFTANDILYANTS, DMITRY FILIMONOV

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**AN ANALYTICAL STUDY OF INFORMATION TECHNOLOGIES
FOR MODELING BUSINESS PROCESSES IN ENTREPRENEURIAL-TYPE
EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

Objective. To analyze modern information technologies for business process modeling and to justify their application for improving the management efficiency of entrepreneurial-type educational institutions.

Methodology. The study employs methods of systems analysis, comparative research, business process modeling (specifically BPMN and UML notations), as well as methods of structural-functional analysis. A synthesis of scientific approaches to the digital transformation of educational institutions is presented.

Results. The study identified three groups of business processes in entrepreneurial-type educational institutions: core, managerial, and support processes. A hierarchical structure of processes by management levels (strategic, tactical, operational) was developed. The feasibility of using BPMN for modeling process logic and UML for designing information systems was substantiated. An integrated model of digital interaction between LMS, CRM, ERP, and BI systems was proposed. A generalized architecture of a digital management system for an educational institution was constructed.

Originality. It lies in the development of an integrated approach to modeling business processes of entrepreneurial-type educational institutions based on the combination of BPMN and UML. Formulation of a generalized multi-level model of an educational organization as a unified digital ecosystem. Identification of the mechanism for the interaction of business processes and information systems within the framework of an integrated management architecture. Justification of the concept of transitioning from process modeling to automated management of the educational environment

Practical value. It lies in the possibility of applying the results to: the automation of management processes in educational institutions; the implementation of digital platforms for managing the educational process; the integration of LMS, CRM, and ERP systems into a single information system; improving the effectiveness of management decision-making; optimizing resources and reducing the costs of managing educational activities.

Keywords: business processes; BPMN; UML; entrepreneurial-type educational institution; digital transformation; information systems; modeling.

Засновником журналу «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 журналу, «Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности», який видавався з березня 1958 року у Київському технологічному інституті легкої промисловості (СРСР).

Журнал «Технології та інжиніринг» – це рецензоване наукове видання з відкритим доступом, призначене для публікації результатів наукових і прикладних досліджень в галузі хімії, хімічних технологій та фармацевції. Особлива увага приділяється питанням розробки, дослідження та впровадження ресурсоефективних, енергозберігаючих процесів хімії, хімічних технологій та фармацевції, екологічної безпеки хімічних і фармацевтичних виробництв, впровадження принципів «зеленої» хімії, а також переробки відходів та вторинної сировини.

Програмні цілі журналу «Технології та інжиніринг»: публікація оригінальних статей, висвітлення результатів новітніх досліджень та актуальних досягнень у галузі технічних наук.

Тематична спрямованість журналу «Технології та інжиніринг»: фундаментальні і прикладні дослідження в галузі хімії, хімічних технологій та фармацевції. Особлива увага приділяється питанням розробки, дослідження та впровадження ресурсоефективних, енергозберігаючих процесів хімії, хімічних технологій та фармацевції, екологічної безпеки хімічних і фармацевтичних виробництв, впровадження принципів «зеленої» хімії, а також переробки відходів та вторинної сировини.

Тематика секції також охоплює:

- створення та дослідження нових хімічних матеріалів (полімерних, композиційних, наноматеріалів);
- хімічні, фармацевтичні та біохімічні процеси і технології;
- процеси каталізу, тепло- і масообміну;
- моделювання та цифровізація хіміко-технологічних і фармацевтичних виробництв;
- забезпечення якості продукції та промислова безпека.

До друку приймаються нові статті, які не були опубліковані раніше і не розглядаються в інших виданнях, а також мають важливе наукове, теоретичне та практичне значення та є результатом оригінальних наукових досліджень авторів.

Науковий профіль видання (назва кластера): Хімія, хімічні технології та фармацевція:

- **G1 Хімічні технології та інженерія,**
- **I8 Фармація.**

Видання орієнтоване на викладачів, студентів і аспірантів, співробітників науково-дослідних установ і фахівців промислового сектору, зацікавлених у розвитку сучасних хімічних і фармацевтичних технологій.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

Комп'ютерний набір та макетування **КРИВОНОС Олена**
Технічний редактор **ПАНАСЮК Ігор**
Відповідальний за поліграфічне виконання **ОВЕЧКІНА Лілія**

Підп. до друку 09.04.2026. Формат 60×84 1/8.
Ум. друк. арк. 11,62. Облік. вид. арк. 9,1. 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 ПП від 19.04.2021р.

Журнал зареєстровано як суб'єкт у сфері друкованих медіа – ідентифікатор R30-05423
(Рішення Національної Ради від 08.08.2024 р. №2520).

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 09.04.2026. Format 60×84 1/8.
Conditional sheet 11.62. Calculated sheet 9.1. Circulation 100 copies. Order N .

KNUTD Instant Printing Department.
Mala Shyianovska Street, 2, Kyiv, 01011, Ukraine.

Certificate КВ №24822–14762 ПП від 19.04.2021 р.

Print media identifier R30-05423, 08.08.2024.

Certificate ДК № 993, 24.07.2002.