ISAP
Instytut Spraw Administracji Publicznej
Lublin, Republic of Poland

INNOVATIONS IN EDUCATION AND SCIENCE:

informational, economic, educational, artistic, legal, psychological, technical and managerial aspects.

International collective monograph

Volume I.

Lublin – Poland

2026

Institute of Public Administration Affairs (ISAP)

INNOVATIONS IN EDUCATION AND SCIENCE: informational, economic, educational, artistic, legal, psychological, technical and managerial aspects.

International collective monograph

Volume I.

Lublin – Poland

2026

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1
UDK 001:37:001.895
I-67

Recommended for publication by the academic council of Institute of Public Administration Affairs
(protocol No. 10 dated 2026-10-01)

REVIEWERS:

prof. dr hab. **JANUSZ NICZYPORUK**, Professor Maria Curie-Sklodowska University in Lublin (Lublin, Republic of Poland).
prof. dr hab. **EWA JASIUK** Professor, Casimir Pulaski Radom University (Radom, Republic of Poland);
prof. dr hab. **Elżbieta ŻYWUCKA – KOZŁOWSKA** Professor, Katedra Postępowania Karnego i Prawa Karnego Wykonawczego University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Republic of Poland);

Authors: ABLAMSKA V., BAIRAMOVA O., BATIUK O., MANKO A., TROBIUK V., GNYLOSKURENKO G., DANYLYUK I., SYNENKO T., DEMYDOVA Y., SYNENKO T., KRAVCHENKO V., KRYMCHAK L., KUZNIETSOV Y., MOZUL I., NOVIKOVA O., OSTAPENKO Z., MEL'NICK V., PARYSHKURA Y., DOVHANIUK V., SALTYKOVA H., FEDORENKO D., ZEMLIANKO H., YAKOVYSHYNA T.

I-67 INNOVATIONS IN EDUCATION AND SCIENCE: informational, economic, educational, artistic, legal, psychological, technical and managerial aspects: International collective monograph on the topic. Volume I. ISAP, Lublin, Poland, 2026. 645 p.

The collective monograph is the result of the generalisation of conceptual work by scientists who study current topics in fields such as Information Technology, Economics, Education, Law, Psychology, Engineering, and Management, viewed through the lens of innovations in education and science.

It is intended for scientists, educators, PhD candidates, master's students, university staff, stakeholders, managers, employees of management bodies at various hierarchical levels, and anyone interested in current issues in Information Technology, Economics, Education, Law, Psychology, Engineering, and Management, all in the context of innovations in education and science.

ISBN: 978-83-8338-408-6
ISBN: 978-617-95591-3-6

© The collective of authors, 2026.

Creative Commons Attribution 4.0 International

AUTHORS:

CHAPTER 1.
Valentyna ABLAMSKA
lecturer Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology (45/1, Knyaziv Ostrozkykh Street, Kyiv, Ukraine)
boltyk@ukr.net
https://orcid.org/0000-0003-0768-4102

CHAPTER 2.
Olena BAIRAMOVA
Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Social and Humanitarian Disciplines, Separate Structural Unit "Danube Institute of Water Transport of the National Transport University", (7, Izmailska Street, Izmail, 68601, Ukraine)
bairamova3456@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-2836-7037

CHAPTER 3.
Oleh BATIUK
Doctor of Laws, Professor
National Academy of the National Guard of (Ukraine 61000, Defenders of Ukraine Square, 3, Kharkiv, Ukraine)
https://orcid.org/0000-0002-2291-4247
ovb1406@gmail.com

Andrii MANKO
PhD, commander of the National Academy of the National Guard of Ukraine, colonel, 61000, Defenders of Ukraine Square, 3, Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0009-0002-9860-9561

Volodymyr TROBIUK
Candidate of Military Sciences, Professor, Head of the Educational and Scientific Center for the Organization of the Educational Process, National Academy of the National Guard of Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-3248-2935

CHAPTER 4.
Ganna GNYLOSKURENKO
PhD, Associate Professor of the Department of Pediatrics, Obstetrics and Gynecology, Educational and Scientifi
c Centre "Institute of Biology and Medicine" Taras Shevchenko National University of Kyiv (Academician Glushkov Avenue, 2, Kyiv)
annagn@knu.ua
https://orcid.org/0000-0003-4141-4579

AUTHORS:

CHAPTER 5.
Iryna DANYLYUK
PhD in Economics West Ukrainian National University, Department of Economic Cybernetics and Digital Technologies, (11, Lvivska Street, Ternopil, 46009, Ukraine)
irynadanylyuk9@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-5090-0926

CHAPTER 6.
Yevheniia DEMYDOVA
Doctor of Philosophy (PhD)
Sumy National Agrarian University, Department of Food Technology and Safety (160 Gerasima Kondratyeva Street, Sumy, 40000, Ukraine)
yevheniia.demydova@snau.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-7933-4251

Tetyana SYNENKO
Doctor of Philosophy (PhD)
Sumy National Agrarian University, Department of Food Technology and Safety (160 Gerasima Kondratyeva Street, Sumy, 40000, Ukraine)
tetiana.synenko@snau.edu.ua
https://orcid.org/0000–0002–5300–5142

CHAPTER 7.
Yevheniia DEMYDOVA
Doctor of Philosophy (PhD)
Sumy National Agrarian University, Department of Food Technology and Safety (160 Gerasima Kondratyeva Street, Sumy, 40000, Ukraine)
yevheniia.demydova@snau.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-7933-4251

Tetyana SYNENKO
Doctor of Philosophy (PhD)
Sumy National Agrarian University, Department of Food Technology and Safety (160 Gerasima Kondratyeva Street, Sumy, 40000, Ukraine)
tetiana.synenko@snau.edu.ua
https://orcid.org/0000–0002–5300–5142

CHAPTER 8.
Viktoriia KRAVCHENKO
Sineor lecturer of the Department of Fundamental Disciplines
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology (45/1, Kniaziv Ostrozkykh., Kyiv, 01011, Ukraine)
viktoriia.kravchenko@viti.edu.ua
https://orcid.org/0000-0003-0399-7013

AUTHORS:

CHAPTER 9.
Liudmyla KRYMCHAK
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Social Work and Management of Social Processes, Oles Honchar Dnipro National University, (72, Nauky Ave., Dnipro, 49000, Ukraine)
l.krymchak308@ukr.net
https://orcid.org/0009-0006-9624-2953

CHAPTER 10.
Yevhen KUZNIETSOV
PhD-Student Hryhorii Skovoroda University in Pereiaslav (30 Sukhomlynsky Street, Pereiaslav, 08401, Ukraine)
kevgen392@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-3994-9092

CHAPTER 11.
Iryna MOZUL
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theory and Methods of Primary Education, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, (Hlukhiv, Ukraine)
mozul.dubok@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-8331-9011

CHAPTER 12.
Olha NOVIKOVA
Candidate of Philological Sciences, Associate Professor Oles Honchar Dnipro National University, Department of English Language for Non-Philological Specialities (72, Nauky Avenue, Dnipro, 49010, Ukraine)
novikovaolga19911991@gmail.com
https//orcid.org/0000-0001-9119-5154

CHAPTER 13.
Zhanna OSTAPENKO
PhD, Senior lecturer
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of Biotechnics and engineering, (37 Beresteiskyi Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine)
zhanna.ost@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-0949-9912

Viktorij MEL'NICK
Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of Biotechnics and engineering, (37 Beresteiskyi Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine)
melnick.viktorij@lll.kpi.ua
https://orcid.org/0000-0002-0004-7218

CHAPTER 14.
Yuliia PARYSHKURA
Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Physical Culture, Sports and Rehabilitation, State University of Trade and Economics, (19 Kyoto St., Kyiv 02156, Ukraine)
y.paryshkura@knute.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-8777-1726

Valerii DOVHANIUK
Senior Lecturer at the Department of Special Physical Training, Penitentiary Academy of Ukraine (34 Honcha Street, Chernihiv, 14000, Ukraine)
vdovhan08@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-2152-1917

AUTHORS:

CHAPTER 15.
Halyna SALTYKOVA
PhD, Associate Professor
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Educational scientific center «Institute of biology and medicine» , Department of Pediatrics, Obstetrics and Gynecology (Volodymyrska Street 64/13, City of Kyiv, Ukraine, 01601)
halyna.saltykova@knu.ua
https://orcid.org/0000-0001-7064-626X

CHAPTER 16.
Daria FEDORENKO
B.Sc. student in Computer Engineering National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Department of Cybersecurity and Intelligent Information Technologies, (Vadym Manko St., 17, Kharkiv, 61070, Ukraine)
d.d.fedorenko@student.csn.khai.edu
https://orcid.org/0009-0008-9623-4501

Heorhii ZEMLIANKO
Ph.D. in cybersecurity, Associate Professor National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Department of Cybersecurity and Intelligent Information Technologies, (Vadym Manko St., 17, Kharkiv, 61070, Ukraine)
g.zemlynko@csn.khai.edu
https://orcid.org/0000-0003-4153-7608

CHAPTER 17.
Tetiana YAKOVYSHYNA
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Department of Primary, Inclusive and Higher Education Pedagogy Rivne State University of t Humanities
(Plastova str., 31, Rivne, 33000, Ukraine)
yakovyshynat@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9507-3621

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-7
UDC 519.17:519.8

CHAPTER 1.
GRAPH THEORY METHODS IN MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX NETWORK SYSTEMS

Valentyna ABLAMSKA
lecturer Kruty Heroes Military Institute of
Telecommunications and Information Technology
(45/1, Knyaziv Ostrozkykh Street, Kyiv, Ukraine)
boltyk@ukr.net
https://orcid.org/0000-0003-0768-4102

Abstract. The monograph investigates modern approaches to mathematical modeling, analysis, and optimization of complex systems based on graph theory, mathematical optimization, and artificial intelligence technologies. The feasibility of using graph models to formalize transport, information, logistics, and other network systems is substantiated, particularly for systems whose functional characteristics are determined by the structure of relationships between their constituent objects.

The main mathematical optimization models are considered, including linear, nonlinear, and discrete programming, shortest-path problems, network flow optimization, and routing problems. The potential of heuristic and metaheuristic methods, including genetic algorithms and ant colony optimization, for solving complex combinatorial problems is analyzed. Particular attention is paid to multi-objective optimization and the use of Pareto optimality for developing compromise solutions.

The prospects of integrating classical mathematical methods with machine learning and Graph Neural Networks (GNNs) are substantiated. A conceptual approach to intelligent routing is proposed, in which the prediction of network parameters using artificial intelligence is combined with mathematically justified optimization of the resulting solution. An approach to adaptive selection of an optimization algorithm depending on the structural and functional characteristics of the problem under investigation is developed.

The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed approaches to the modeling and optimization of transport, information, logistics, and communication networks, as well as to the development of decision-support software systems. The proposed approaches can serve as a basis for further research in mathematical modeling, graph theory, optimization, intelligent data analysis, and artificial intelligence.

Keywords: mathematical modeling, mathematical optimization, graph theory, graph algorithms, complex systems, routing, multi-objective optimization, metaheuristic algorithms, machine learning, Graph Neural Networks, artificial intelligence, adaptive optimization.

МЕТОДИ ТЕОРІЇ ГРАФІВ У МАТЕМАТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ СКЛАДНИХ МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ

Анотація. У монографії досліджено сучасні підходи до математичного моделювання, аналізу та оптимізації складних систем на основі методів теорії графів, математичної оптимізації та технологій штучного інтелекту. Обґрунтовано доцільність використання графових моделей для формалізації транспортних, інформаційних, логістичних та інших мережевих систем, у яких функціональні характеристики визначаються структурою взаємозв'язків між об'єктами.

Розглянуто основні математичні моделі оптимізації, зокрема задачі лінійного, нелінійного та дискретного програмування, задачі пошуку найкоротших шляхів, оптимізації мережевих потоків і маршрутизації. Проаналізовано можливості застосування евристичних та метаевристичних методів, зокрема генетичних алгоритмів і алгоритмів мурашиної колонії, для розв'язання складних комбінаторних задач. Особливу увагу приділено багатокритеріальній оптимізації та використанню Парето-оптимальності для формування компромісних рішень.

Обґрунтовано перспективність інтеграції класичних математичних методів із машинним навчанням і графовими нейронними мережами (Graph Neural Networks). Запропоновано концептуальний підхід до інтелектуальної маршрутизації, у якому прогнозування параметрів мережі засобами штучного інтелекту поєднується з математично обґрунтованим пошуком оптимального рішення. Розроблено підхід до адаптивного вибору оптимізаційного алгоритму залежно від структурних та функціональних характеристик досліджуваної задачі.

Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання під час моделювання та оптимізації транспортних, інформаційних, логістичних і комунікаційних мереж, а також у розробленні програмних систем підтримки прийняття рішень. Запропоновані підходи можуть бути використані як основа для подальших досліджень у галузі математичного моделювання, теорії графів, оптимізації, інтелектуального аналізу даних та штучного інтелекту.

Ключові слова: математичне моделювання, математична оптимізація, теорія графів, графові алгоритми, складні системи, маршрутизація, багатокритеріальна оптимізація, метаевристичні алгоритми, машинне навчання, графові нейронні мережі, штучний інтелект, адаптивна оптимізація.

Вступ. Сучасний етап розвитку науки і техніки характеризується стрімким ускладненням систем, що функціонують у різних сферах суспільної діяльності. Транспортні, інформаційні, телекомунікаційні, соціальні, економічні, логістичні та інші системи мають складну структуру взаємозв'язків

між окремими елементами, а ефективність їх функціонування значною мірою залежить від способів організації та оптимізації цих зв'язків. У таких умовах особливого значення набувають математичні методи дослідження складних систем, здатні забезпечити їх формалізований опис, аналіз, прогнозування та оптимізацію.

Одним із найбільш ефективних математичних інструментів моделювання складних систем є теорія графів, яка дає змогу представити систему у вигляді сукупності вершин та ребер, що відображають її структурні елементи та взаємозв'язки між ними. Такий підхід забезпечує можливість дослідження не лише статичної структури системи, але й динаміки процесів, пов'язаних із переміщенням інформації, ресурсів, транспортних потоків або інших об'єктів мережею.

Розвиток цифрових технологій, збільшення обсягів даних та поширення інтелектуальних інформаційних систем зумовлюють необхідність удосконалення традиційних методів графового аналізу. Особливої актуальності набувають задачі пошуку оптимальних маршрутів, визначення найбільш значущих елементів мережі, аналізу її зв'язності, виявлення структурних закономірностей та оптимізації потоків. При цьому зростання розмірності досліджуваних мереж потребує застосування ефективних алгоритмів та математичних моделей, здатних працювати з великими обсягами даних.

Інноваційність сучасних підходів до графового моделювання полягає у поєднанні класичних математичних методів із сучасними обчислювальними технологіями. Теорія графів дедалі активніше інтегрується з методами математичної оптимізації, статистичного аналізу, машинного навчання, штучного інтелекту та технологіями обробки великих даних. Це створює нові можливості для дослідження складних мережевих систем та формування математичних моделей, які можуть використовуватися для прийняття обґрунтованих рішень.

Особливого значення набуває проблема оцінювання ефективності алгоритмів пошуку та маршрутизації. Для однакової мережі різні алгоритмічні підходи можуть демонструвати суттєво різні характеристики за часом виконання, обсягом використаної пам'яті та якістю отриманого результату. Тому важливим напрямом сучасних математичних досліджень є не лише розроблення алгоритмів, а й побудова формалізованих моделей для їх порівняння та оцінювання ефективності залежно від структурних характеристик графа.

Таким чином, актуальність дослідження визначається необхідністю розвитку та практичного застосування інноваційних математичних методів теорії графів для моделювання, аналізу й оптимізації складних мережевих систем, а також необхідністю комплексного оцінювання ефективності алгоритмів пошуку та маршрутизації.

Графові моделі використовуються для представлення транспортних мереж, комп'ютерних і телекомунікаційних систем, соціальних взаємодій, логістичних ланцюгів, інформаційних потоків, виробничих систем та інших об'єктів. У поєднанні з методами оптимізації вони дають змогу визначати найкоротші маршрути, мінімізувати витрати, знаходити оптимальні структури мереж та підвищувати ефективність використання ресурсів *(Zverovich V., 2021).*

Сучасний етап розвитку графових досліджень характеризується також переходом від роботи з відносно невеликими графами до аналізу масштабних мереж, що містять мільйони і навіть мільярди взаємопов'язаних елементів. Це висуває нові вимоги до алгоритмів пошуку, зокрема щодо їх часової та просторової складності *(van der Grinten, Angriman, Meyerhenke, 2020).*

Перспективним напрямом є поєднання теорії графів із технологіями штучного інтелекту та машинного навчання. Зокрема, розвиток графових нейронних мереж створює нові можливості для аналізу структурованих даних, у яких взаємозв'язки між об'єктами мають таке саме значення, як і характеристики самих об'єктів. Таким чином, математичні методи теорії графів

стають важливим елементом сучасної наукової парадигми, орієнтованої на інтеграцію математики, інформатики та інтелектуальних технологій *(Wu Z., Pan S., Chen F., Long G., Zhang C., Yu P. S., 2021).*

Окремий напрям становлять дослідження складності алгоритмів та оцінювання їх ефективності. У цьому контексті важливе значення мають асимптотичні оцінки, що дають змогу визначити характер зміни обчислювальних витрат залежно від розміру вхідних даних. Водночас теоретичні оцінки не завжди повністю характеризують поведінку алгоритмів у реальних або модельованих мережах. Це зумовлює доцільність поєднання теоретичного аналізу з експериментальним дослідженням.

Незважаючи на значний обсяг наукових результатів, актуальною залишається проблема комплексного поєднання математичного моделювання мережевих структур, алгоритмічного аналізу та кількісного оцінювання ефективності методів пошуку й маршрутизації. Саме цей аспект визначає напрям запропонованого дослідження.

Отже, запропоноване дослідження поєднує фундаментальний математичний апарат теорії графів із сучасними алгоритмічними та обчислювальними методами, що відповідає сучасним тенденціям розвитку інноваційних математичних досліджень та цифрових технологій.

Отримані результати дослідження можуть бути використані також в освітньому процесі під час викладання дисциплін «Дискретна математика», «Теорія графів», «Алгоритми та структури даних», «Математичне моделювання», «Оптимізаційні методи та моделі», а також під час підготовки курсових, кваліфікаційних і науково-дослідних робіт.

1. Теоретичні засади застосування теорії графів у математичному моделюванні.

Розвиток сучасної науки, техніки та цифрових технологій супроводжується постійним ускладненням досліджуваних систем. Більшість сучасних об’єктів характеризується не лише значною кількістю

окремих елементів, але й великою кількістю зв'язків між ними. Така особливість притаманна транспортним мережам, комп'ютерним та телекомунікаційним системам, логістичним структурам, соціальним мережам, інформаційним системам, системам управління та багатьом іншим об'єктам.

Для математичного дослідження таких систем необхідно здійснити їх формалізацію, тобто перейти від реального об'єкта до його абстрактного математичного представлення. При цьому важливо зберегти ті властивості об'єкта, які визначають його функціонування, і водночас виключити другорядні характеристики, що не мають безпосереднього впливу на досліджувані процеси.

Одним із найбільш ефективних засобів такого абстрагування є теорія графів. Графова модель дозволяє представити складну систему у вигляді множини об'єктів та зв'язків між ними. У найпростішому випадку об'єкти системи відповідають вершинам графа, а взаємозв'язки між об'єктами — його ребрам.

Формально граф можна представити як пару:

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

де V – непорожня множина вершин графа, а E – множина ребер, що визначають зв'язки між вершинами.

У прикладному математичному моделюванні множина V може відповідати різноманітним об'єктам реальної системи. Наприклад, для транспортної мережі вершинами можуть бути міста, перехрестя або транспортні вузли; для комп'ютерної мережі – сервери, маршрутизатори або інші мережеві пристрої; для інформаційної системи – документи, вебсторінки або інформаційні ресурси.

Множина E відображає взаємодії між відповідними об'єктами. У транспортній мережі ребро може представляти автомобільну дорогу, у

комп'ютерній мережі – канал передавання даних, а в соціальній мережі – відношення між користувачами.

Таким чином, одна з основних переваг графового моделювання полягає у відокремленні структурного аспекту системи від її конкретної предметної області. Один і той самий математичний апарат може бути використаний для опису систем, які мають абсолютно різну фізичну природу.

Наприклад, умовна система з п'ятьма об'єктами та відповідними зв'язками може бути представлена графом:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}.$$

Якщо між об'єктами існують зв'язки

$$E = \{(v_1, v_2), (v_1, v_3), (v_2, v_4), (v_3, v_4), (v_4, v_5)\},$$

то граф $G = (V, E)$ є математичною моделлю відповідної мережевої структури.

Важливою властивістю графової моделі є можливість включення додаткових параметрів. Зокрема, ребрам можуть бути поставлені у відповідність числові значення, які характеризують відстань, вартість, час передавання інформації, пропускну здатність, рівень ризику або інший параметр.

У такому випадку граф стає зваженим:

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

де W – функція ваг ребер.

Наприклад, для транспортної мережі вагове значення w_{i} може характеризувати довжину дороги між вершинами v_i та v. Якщо досліджується задача мінімізації часу руху, тоді w_{ij} може відповідати часу проходження відповідної ділянки маршруту.

Саме введення ваг дозволяє перейти від структурного аналізу мережі до розв'язування оптимізаційних задач. Однією з найбільш відомих є задача пошуку найкоротшого шляху між двома вершинами.

Нехай задано граф $G = (V, E, W)$, початкову вершину s та кінцеву вершину t. Для кожного допустимого шляху P(s,t) визначається його сумарна вага:

$$L(P) = \Sigma\, w(e),$$

де підсумовуються ваги всіх ребер, що належать шляху P.

Тоді задача пошуку оптимального маршруту може бути сформульована як:

$$P^* = arg\ min\ L(P).$$

Отримана математична постановка є фундаментальною для багатьох прикладних задач маршрутизації, транспортної логістики, передавання інформації та оптимізації мереж.

Таким чином, теорія графів забезпечує не лише компактний спосіб представлення складної системи, а й математичний апарат для подальшого аналізу її структури та функціонування.

У контексті цього дослідження особливого значення набуває взаємозв'язок між структурними характеристиками графа та ефективністю алгоритмів, які використовуються для його аналізу. Кількість вершин і ребер, щільність графа, ступені вершин, наявність циклів, зв'язність та інші характеристики безпосередньо впливають на обчислювальні витрати алгоритмів.

Отже, математичне представлення мережі у вигляді графа є не кінцевою метою, а початковим етапом побудови математичної моделі, на основі якої здійснюються алгоритмічний аналіз, оптимізація та оцінювання ефективності відповідних методів.

Залежно від характеру взаємозв'язків між елементами системи розрізняють орієнтовані та неорієнтовані графи.

У неорієнтованому графі ребро між вершинами v_i та v□ не має визначеного напряму. Формально ребро можна подати як невпорядковану пару:

$$e = \{v_i, v□\}.$$

Це означає, що зв'язок між двома об'єктами є симетричним. Якщо вершина v_i пов'язана з вершиною $v□$, то одночасно $v□$ пов'язана з v_i.

Неорієнтовані графи доцільно використовувати для моделювання систем, у яких взаємодія є двосторонньою. Наприклад, якщо автомобільна дорога дозволяє рух в обох напрямках, її можна представити одним неорієнтованим ребром.

Інший приклад – мережа фізичних зв'язків між пристроями, де сам факт наявності каналу не передбачає фіксованого напряму передавання.

В орієнтованому графі кожне ребро має певний напрям. Таке ребро називається дугою та може бути представлено впорядкованою парою:

$$e = (v_i, v□).$$

У цьому випадку наявність дуги $(v_i, v□)$ не означає обов'язкової наявності дуги $(v□, v_i)$.

Орієнтовані графи є особливо важливими для моделювання систем, у яких напрям взаємодії має принципове значення. Прикладами можуть бути дороги з одностороннім рухом, інформаційні потоки, залежності між програмними компонентами, мережі передавання даних та технологічні процеси.

Для орієнтованого графа розрізняють вхідний та вихідний степінь вершини. Вихідний степінь вершини v характеризує кількість дуг, які виходять із неї, і позначається $deg^+(v)$. Вхідний степінь $deg^-(v)$ визначає кількість дуг, які входять у вершину.

Для неорієнтованого графа степінь вершини визначається кількістю ребер, інцидентних цій вершині:

$deg(v)$ = кількість ребер, що містять v.

Структурна відмінність між орієнтованими та неорієнтованими графами має безпосередній вплив на алгоритми їх аналізу. У задачах пошуку маршруту напрям ребер може обмежувати множину допустимих шляхів, тому алгоритм

повинен враховувати не лише факт існування зв'язку, а й напрям його проходження.

Особливе місце займають зважені орієнтовані графи, у яких кожна дуга характеризується числовим параметром. Саме такі моделі часто використовуються для представлення реальних транспортних та інформаційних мереж.

Наприклад, для транспортної мережі можна визначити:

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

де V – множина населених пунктів або транспортних вузлів, E — множина доріг, W – множина довжин або часу проходження відповідних доріг.

Якщо дорога між v_1 та v_2 має довжину 15 км, а зворотний напрям має інше значення через особливості транспортного руху, то транпортну мережу можна задати:

$w(v_1, v_2) = 15,$

$w(v_2, v_1) = 18.$

У цьому випадку модель точніше відображає реальну систему, оскільки враховує напрям та відповідні характеристики мережі.

Отже, вибір між орієнтованою та неорієнтованою моделлю повинен визначатися природою досліджуваної системи. Неправильний вибір типу графа може призвести до спотворення математичної моделі та, як наслідок, до отримання некоректних результатів алгоритмічного аналізу.

Для більшості прикладних задач простого встановлення факту наявності зв'язку між двома об'єктами недостатньо. Необхідно враховувати кількісні характеристики цього зв'язку. З цією метою використовують зважені графи. У такому графі кожному ребру або дузі ставиться у відповідність певна вага. Функція ваг може бути задана як:

$$w: E \rightarrow R.$$

Залежно від задачі значення $w(e)$ може мати різний зміст.

У транспортних системах вага може характеризувати: відстань, час руху, вартість перевезення, витрати пального, рівень завантаження дороги, рівень ризику.

У комп'ютерних мережах вага може характеризувати: затримку передавання, пропускну здатність, кількість проміжних вузлів, імовірність втрати пакета, енергетичні витрати.

Таким чином, математична модель мережі може бути адаптована до конкретного критерію оптимізації.

Якщо необхідно мінімізувати відстань, цільова функція має вигляд:

$$L(P) = \Sigma\, d(e).$$

Якщо мінімізується час:

$$T(P) = \Sigma\, t(e).$$

Якщо критерієм є вартість:

$$C(P) = \Sigma\, c(e).$$

У більш складних задачах може застосовуватися багатокритеріальна оптимізація. Наприклад, маршрут може одночасно оцінюватися за довжиною, часом та вартістю. Тоді необхідно визначити спосіб узгодження окремих критеріїв.

Один із можливих підходів полягає у використанні зваженої цільової функції:

$$F(P) = \alpha L(P) + \beta T(P) + \gamma C(P),$$

де α, β та γ – коефіцієнти значущості відповідних критеріїв.

Такий підхід дозволяє перейти від простої задачі пошуку найкоротшого шляху до більш складної задачі оптимізації мережевої системи. Важливою характеристикою зваженого графа є розподіл ваг між його ребрами. Якщо ваги суттєво відрізняються, вибір маршруту може значною мірою залежати від декількох ребер із високими або низькими значеннями ваг. Таким чином, при дослідженні ефективності алгоритмів необхідно враховувати не лише кількість вершин і ребер, але й характер розподілу ваг.

Вибір способу представлення графа в пам'яті комп'ютера є важливим фактором ефективності алгоритмів. Для одного й того самого графа різні структури даних можуть мати суттєво різні вимоги до пам'яті та часу виконання операцій. Найбільш поширеними способами представлення графів є матриця суміжності, матриця інцидентності та список суміжності.

Матрицею суміжності графа $G = (V, E)$ називають квадратну матрицю A розмірності $n \times n$, де n – кількість вершин графа.

Елемент a_{ij} визначається залежно від типу графа. Для простого неорієнтованого графа:

$a_{ij} = 1$, якщо вершини v_i та v_j з'єднані ребром;

$a_{ij} = 0$, якщо між ними ребра немає.

Для зваженого графа значення a_{ij} може дорівнювати вазі відповідного ребра.

Наприклад, для графа з чотирма вершинами матриця суміжності може мати вигляд:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 0 & 3 \\ 4 & 1 & 4 & 0 \end{pmatrix}.$$

У такому представленні безпосередньо видно, між якими вершинами існують зв'язки та які значення мають їхні ваги.

Основною перевагою матриці суміжності є постійний час перевірки наявності ребра між двома заданими вершинами.

Водночас матриця потребує $O(n^2)$ комірок пам'яті незалежно від кількості фактичних ребер. Тому для розріджених графів, у яких m значно менше за n^2, матриця суміжності може бути неефективною з точки зору використання пам'яті.

Для щільних графів, навпаки, матриця суміжності може бути цілком доцільною.

Матриця інцидентності характеризує відношення між вершинами та ребрами графа. Якщо граф має n вершин та m ребер, матриця інцидентності має розмір $n \times m$.

Для неорієнтованого графа елемент матриці може бути визначений так:

b_i = 1, якщо вершина v_i інцидентна ребру e;

b_i = 0 в іншому випадку.

Для орієнтованих графів можуть використовуватися значення: -1 та $+1$ для позначення відповідно початку та кінця дуги. Матриця інцидентності є зручною для дослідження структурних властивостей графів та деяких задач мережевого аналізу. Проте її розмір залежить одночасно від кількості вершин і ребер, що може призводити до значних витрат пам'яті для великих мереж.

Список суміжності являє собою структуру, в якій для кожної вершини зберігається перелік вершин, безпосередньо з'єднаних із нею.

Наприклад:

$$v_1 \rightarrow v_2, v_4$$
$$v_2 \rightarrow v_1, v_3$$
$$v_3 \rightarrow v_2, v_4$$
$$v_4 \rightarrow v_1, v_3.$$

Основною перевагою списку суміжності є ефективне використання пам'яті для розріджених графів. Його просторова складність становить O(n + m).

Саме тому список суміжності широко використовується в алгоритмах обходу графів та пошуку найкоротших шляхів.

Таблиця 1

Порівняння способів представлення графів

Характеристика	Матриця суміжності	Матриця інцидентності	Список суміжності
Обсяг пам'яті	O(n²)	O(nm)	O(n+m)
Перевірка наявності ребра	O(1)	залежить від реалізації	залежить від реалізації
Перебір сусідів вершини	O(n)	O(m)	O(deg(v))
Доцільність для розріджених графів	низька	низька	висока
Доцільність для щільних графів	висока	середня	середня
Зручність для BFS/DFS	середня	низька	висока
Простота реалізації	висока	середня	висока

Для дослідження алгоритмів пошуку та маршрутизації особливо важливою є відмінність між $O(n^2)$ та $O(n+m)$. Якщо граф є розрідженим, використання списку суміжності може суттєво зменшити обсяг пам'яті та кількість операцій.

Для кількісного дослідження структури графа необхідно використовувати систему математичних характеристик. Однією з базових характеристик є кількість вершин:

$$n = |V|.$$

Іншою основною характеристикою є кількість ребер:

$$m = |E|.$$

Співвідношення між n та m визначає загальну структуру мережі та дозволяє розрізняти розріджені й щільні графи.

Для неорієнтованого графа степінь вершини v визначається кількістю ребер, інцидентних цій вершині $deg(v)$.

Високий степінь вершини може свідчити про її значну структурну роль у мережі. Для орієнтованого графа використовують два показники:

$deg^{+}(v)$ – вихідний степінь;

$deg^{-}(v)$ – вхідний степінь.

Важливою характеристикою є відстань між вершинами. Вона визначається як довжина найкоротшого шляху між відповідними вершинами $d(u, v)$.

Якщо граф є зваженим, відстань визначається за сумарною вагою шляху.

На основі відстаней визначаються діаметр та радіус графа. Діаметр графа:

$$D(G) = \max_{u,v \epsilon V} d(u, v),$$

де $G = (V, E)$ — граф;

V – множина його вершин;

$d(u, v)$ – найкоротша відстань між вершинами u та v;

$D(G)$ – діаметр графа і його максимум береться за всіма парами вершин.

Радіус визначається як мінімальна з максимальних відстаней від кожної вершини до всіх інших вершин:

$$R(G) = \min_{u \epsilon V} \max_{v \epsilon V} d(u, v).$$

Діаметр характеризує найбільшу відстань між двома вершинами мережі, тоді як радіус дозволяє оцінити, наскільки компактною є мережа відносно найбільш центральної вершини.

Радіус характеризує мінімально можливу максимальну відстань від однієї вершини до всіх інших і може використовуватися для оцінювання компактності мережі та визначення її найбільш центральних вершин.

Важливою характеристикою є також середня довжина найкоротшого шляху. Для зв'язного графа вона може бути визначена як середнє значення відстаней між усіма парами вершин:

$$L = [1 / (n(n-1))] \times \Sigma\, d(u, v),$$

де сума здійснюється за всіма різними парами вершин.

Ця характеристика є важливою при аналізі мережевих систем, оскільки дозволяє оцінювати загальну ефективність зв'язків між елементами мережі.

Ще одним важливим показником є щільність графа. Для неорієнтованого простого графа:

$$\rho = 2m / [n(n-1)].$$

Значення ρ належить інтервалу від 0 до 1.

Якщо ρ близьке до нуля, граф є розрідженим. Якщо значення наближається до одиниці, граф є щільним. Щільність безпосередньо впливає на поведінку алгоритмів. У розріджених графах кількість можливих зв'язків значно менша, тому алгоритми, які використовують структури типу списків суміжності, можуть працювати ефективніше з точки зору пам'яті та кількості операцій.

У щільних графах, навпаки, кількість ребер є співмірною з n^2, тому використання матриці суміжності може бути виправданим.

Складні мережі характеризуються неоднорідною структурою, у якій різні вершини можуть мати принципово різну роль.

Одні вершини можуть мати невелику кількість зв'язків, тоді як інші — бути пов'язаними з великою кількістю елементів. Такі вершини можуть виконувати функції центральних вузлів або своєрідних «хабів».

Для кількісної оцінки ролі вершини можуть використовуватися різні показники центральності. Одним із найпростіших є ступенева центральність, що визначається через степінь вершини:

$$C_D(v) = deg(v),$$

де $C_D(v)$ – степенева центральність вершини v;

$deg(v)$ – ступінь вершини, тобто кількість ребер, інцидентних вершині v.

Інший підхід пов'язаний із відстанями від вершини до інших вершин. У такому випадку центральною вважається вершина, яка має невеликі середні відстані до інших елементів мережі.

Ще одним важливим структурним поняттям є зв’язність. Граф називається зв’язним, якщо між будь-якими двома його вершинами існує шлях. Якщо граф не є зв’язним, він складається з декількох компонент зв’язності.

Для мережевих систем це має безпосереднє практичне значення. Наприклад, якщо транспортна мережа розпадається на окремі компоненти, переміщення між деякими об’єктами стає неможливим. У комп’ютерній мережі аналогічна ситуація означає втрату зв’язку між окремими групами пристроїв.

Структурні властивості графа також визначають можливість застосування певних алгоритмів. Наприклад, алгоритм пошуку найкоротшого шляху між двома вершинами не може знайти маршрут, якщо відповідні вершини належать різним компонентам зв’язності.

Особливу роль відіграє характер розподілу степенів вершин. У реальних мережах часто спостерігається ситуація, коли більшість вершин має невелику кількість зв’язків, а невелика кількість вершин характеризується дуже високим степенем. Такі структурні властивості суттєво впливають на поведінку алгоритмів обходу, пошуку та маршрутизації. Складні мережі можуть також характеризуватися наявністю кластерів – груп вершин, між якими існує значно більше зв’язків, ніж із вершинами інших груп.

Кластерна структура може виникати в соціальних мережах, інформаційних системах, транспортних мережах та інших прикладних областях.

Отже, математичне дослідження мережі повинно враховувати не лише її розмір, але й внутрішню структуру. Два графи з однаковою кількістю вершин і ребер можуть мати різну топологію та, відповідно, різну обчислювальну поведінку алгоритмів.

Це положення є принципово важливим для подальшого дослідження, оскільки порівняння алгоритмів лише за кількістю вершин графа не завжди дозволяє адекватно оцінити їх практичну ефективність.

Для побудови математичної моделі мережевої системи необхідно визначити її основні елементи та взаємозв'язки. У загальному випадку мережу можна представити як трійку:

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

де V – множина об'єктів, E – множина взаємозв'язків, W – множина параметрів, пов'язаних із відповідними зв'язками.

Розглянемо транспортну мережу. Нехай:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v□\},$$

де кожна вершина відповідає транспортному вузлу.

Множина:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e□\}$$

містить дороги або інші допустимі транспортні зв'язки.

Для кожного ребра e_{i} визначається вага w_{i}.

Наприклад:

$$w_{\text{i}} = \text{довжина відповідної дороги.}$$

Тоді для будь-якого маршруту $P = (v_1, v_2, \dots, v□)$ його загальна довжина визначається як:

$$L(P) = \Sigma\, w(v_{\text{i}}, v_{\text{i+1}}).$$

Оптимальний маршрут визначається умовою:

$$L(P*) = min\, L(P).$$

У разі використання іншого критерію оптимізації відповідним чином змінюється функція ваг.

Наприклад, якщо необхідно мінімізувати час:

$$T(P) = \Sigma\, t(v_{\text{i}}, v_{\text{i+1}}).$$

Якщо необхідно мінімізувати фінансові витрати:

$$C(P) = \Sigma\, c(v_{\text{i}}, v_{\text{i+1}}).$$

Такий підхід дозволяє використовувати одну графову структуру для різних математичних моделей.

У більш складному випадку мережа може характеризуватися декількома параметрами одночасно. Тоді кожному ребру ставиться у відповідність вектор:

$$W(e) = (w_1(e), w_2(e), \dots, w_n(e)).$$

Наприклад:

$$W(e) = (\text{відстань, час, вартість}).$$

У такому випадку виникає задача багатокритеріальної оптимізації.

Один із способів її формалізації полягає у введенні інтегрального критерію:

$$F(P) = \alpha_1 F_1(P) + \alpha_2 F_2(P) + \dots + \alpha_n F_n(P),$$

де α_i – вагові коефіцієнти критеріїв.

Таким чином, графова модель створює універсальну основу для формалізації широкого спектра прикладних задач.

У контексті цього дослідження особливого значення набуває задача визначення оптимального маршруту між двома вершинами. Нехай задано зважений граф:

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

з початковою вершиною $s \in V$ та кінцевою вершиною $t \in V$.

Нехай $P(s,t)$ – множина всіх допустимих шляхів від s до t.

Для кожного шляху P визначимо його вартість:

$$F(P) = \Sigma\, w(e), e \in P.$$

Тоді задача пошуку оптимального маршруту має вигляд:

$$P^* = arg\ min\ F(P).$$

Ця математична постановка є основою великої кількості задач, що виникають у практичних мережевих системах. Якщо ваги ребер відповідають відстаням, отримуємо задачу пошуку найкоротшого шляху. Якщо ваги відповідають часовим витратам, отримуємо задачу пошуку найшвидшого маршруту. Якщо ваги характеризують фінансові витрати, задача полягає у мінімізації вартості переміщення. При цьому алгоритмічне розв'язання задачі залежить від властивостей ваг. Наприклад, класичний алгоритм Дейкстри

орієнтований на графи з невід'ємними вагами ребер. У випадках, коли ваги можуть бути від'ємними, необхідно застосовувати інші алгоритмічні підходи.

Отже, математична модель не лише визначає структуру задачі, але й впливає на вибір алгоритму її розв'язання. У практичних системах також можуть існувати додаткові обмеження. Наприклад, маршрут може проходити лише через певні вершини, мати обмеження за часом або пропускною здатністю. Тоді задача може бути сформульована як: мінімізувати $F(P)$ за умов: P належить допустимій множині маршрутів, ресурсні обмеження виконуються, умови зв'язності виконуються.

Таким чином, проста задача найкоротшого шляху є базовим випадком більш загального класу оптимізаційних задач мережевого моделювання.

Для подальшого дослідження принципово важливо встановити, які параметри графа впливають на обчислювальну ефективність алгоритмів.

До основних таких параметрів належать: кількість вершин n, кількість ребер m, щільність графа ρ, середній степінь вершини, діаметр, кількість компонент зв'язності, характер розподілу ваг, наявність циклів, структура кластерів.

Традиційна оцінка складності алгоритмів часто задається через асимптотичні функції.

Наприклад, для обходу графа з використанням списків суміжності BFS та DFS мають часову складність порядку: $O(n + m)$.

Для матриці суміжності аналогічні процедури можуть вимагати: $O(n^2)$ операцій, оскільки для кожної вершини необхідно аналізувати відповідний рядок матриці.

Для алгоритму Дейкстри складність залежить від способу його реалізації. При використанні простої структури пошуку мінімальної відстані вона може мати порядок: $O(n^2)$, тоді як використання пріоритетної черги дозволяє отримати оцінку порядку: $O((n + m)\, log\, n)$ для відповідної реалізації зі списками суміжності.

Ці теоретичні результати показують, що вибір структури даних та алгоритму повинен здійснюватися комплексно. Наприклад, для розрідженого графа доцільним може бути використання списку суміжності та алгоритму, складність якого залежить від $n + m$.

Для щільного графа переваги такого підходу можуть зменшуватися, оскільки m наближається до n^2.

Таким чином, ефективність алгоритму є функцією не лише самого алгоритму, але й характеристик вхідного графа.

У загальному вигляді можна записати:

$$E_{alg} = f(n, m, \rho, D, R, W, S),$$

де E_{alg} – показник ефективності алгоритму;

n – кількість вершин;

m – кількість ребер;

ρ – щільність графа;

D – діаметр;

R – радіус;

W – характеристики ваг;

S – інші структурні характеристики.

Така постановка дозволяє перейти від традиційного одновимірного аналізу складності до комплексного дослідження залежності ефективності алгоритму від параметрів мережі. Саме цей підхід доцільно використовувати в представленому дослідженні.

У загальному випадку алгоритмічний аналіз графа можна представити послідовністю: графова модель → структурний аналіз → вибір алгоритму → обчислення → оцінювання результату → прийняття рішення.

Для сучасних мереж недостатньо оцінювати алгоритми лише за асимптотичними характеристиками. Важливе значення має їх фактична поведінка на графах різної структури, розмірності та щільності.

Саме тому інноваційний підхід до аналізу графів передбачає поєднання теоретичної оцінки складності, математичного моделювання та обчислювального експерименту.

2. Інноваційні методи теорії графів для аналізу складних мереж.

Однією з базових задач теорії графів є систематичний обхід його вершин. Такий обхід необхідний для перевірки зв'язності, пошуку компонент, виявлення циклів, побудови дерев пошуку та розв'язання багатьох прикладних задач.

Найбільш відомими алгоритмами обходу є пошук у ширину BFS (Breadth-First Search) та пошук у глибину DFS (Depth-First Search).

Обидва алгоритми починають роботу з визначеної початкової вершини, але використовують різні стратегії побудови маршруту обходу.

BFS досліджує граф пошарово: спочатку всі вершини, безпосередньо пов'язані з початковою, потім вершини наступного рівня тощо. DFS, навпаки, намагається максимально заглибитися вздовж одного напряму, повертаючись назад лише після завершення відповідної гілки. Вибір між BFS та DFS визначається поставленою задачею.

Алгоритм BFS використовує структуру даних черга. Нехай задано граф $G = (V, E)$ та початкову вершину s.

На першому етапі вершина s додається до черги та позначається як відвідана. Далі із черги вилучається вершина, визначаються всі її невідвідані сусіди, вони позначаються як відвідані та додаються до черги. Процедура повторюється до спорожнення черги.

Основна ідея алгоритму полягає в тому, що вершини обробляються відповідно до їх відстані від початкової вершини. Тому для незваженого графа BFS дозволяє визначити найкоротшу за кількістю ребер відстань від початкової вершини до кожної досяжної вершини.

Позначимо цю відстань через $dist(s, v)$. Тоді BFS гарантує, що $dist(s, v)$ дорівнює мінімальній кількості ребер серед усіх шляхів від s до v.

Для графа, представленого списком суміжності, часова складність BFS становить $O(n + m)$. Це означає, що кожна вершина та кожне ребро обробляються обмежену кількість разів.

Для матриці суміжності складність обходу може становити $O(n^2)$. Отже, вже на цьому етапі проявляється вплив способу представлення графа на ефективність алгоритму.

BFS використовується для пошуку найкоротшого шляху в незважених графах, визначення компонент зв'язності, перевірки досяжності, побудови рівнів графа, перевірки двочастковості та пошуку вершин на заданій відстані.

Для мережевих систем BFS може застосовуватися, наприклад, для визначення мінімальної кількості переходів між вузлами інформаційної мережі.

Алгоритм DFS використовує іншу стратегію обходу. Після переходу до сусідньої вершини алгоритм продовжує рух у глибину, доки існує невідвідана вершина.

DFS може реалізовуватися рекурсивно або за допомогою явного стека.

Загальна схема полягає у виборі початкової вершини, позначенні її як відвіданої, переході до невідвіданого сусіда та повторенні процедури. Якщо невідвіданих сусідів немає, алгоритм повертається до попередньої вершини.

Для списку суміжності часова складність також становить $O(n + m)$.

DFS використовується для визначення компонент зв'язності, виявлення циклів, топологічного сортування, побудови остовного дерева, пошуку мостів, точок артикуляції та аналізу структури орієнтованих графів.

Особливо важливим є використання DFS для аналізу структури графа. Якщо під час обходу з поточної вершини алгоритм намагається перейти до вже відвіданої вершини, це може бути ознакою існування циклу; точна процедура залежить від типу графа.

BFS та DFS мають однакову асимптотичну часову складність при використанні списку суміжності, але суттєво відрізняються за логікою роботи.

Однією з найбільш важливих задач теорії графів є пошук найкоротшого шляху між вершинами.

Нехай задано зважений граф $G = (V, E, W)$. Для кожного ребра $e \in E$ задано невід'ємну вагу $w(e) \geq 0$. Необхідно знайти найкоротші шляхи від заданої вершини s до всіх інших вершин.

Одним із найбільш відомих методів розв'язання цієї задачі є алгоритм Дейкстри.

Основна ідея алгоритму полягає у поступовому формуванні множини вершин, для яких найкоротша відстань від початкової вершини вже визначена.

На початку $d(s) = 0$, а для всіх інших вершин $d(v) = \infty$. На кожному кроці обирається невідвідана вершина з мінімальним поточним значенням $d(v)$. Після цього здійснюється релаксація її сусідів.

Якщо для ребра (u, v) виконується $d(v) > d(u) + w(u, v)$, значення відстані оновлюється: $d(v) = d(u) + w(u, v)$. Одночасно можна зберігати попередню вершину $prev(v) = u$. Це дозволяє після завершення алгоритму відновити сам маршрут, а не лише його довжину.

Алгоритм Дейкстри має важливу математичну властивість: за умови невід'ємних ваг після вибору вершини з мінімальною поточною відстанню її значення вже не потребує подальшого зменшення. Саме ця властивість забезпечує коректність алгоритму.

Ефективність алгоритму значною мірою залежить від структури даних, яка використовується для вибору вершини з мінімальною відстанню.

При простій реалізації на основі масиву складність має порядок $O(n^2)$. При використанні пріоритетної черги та списку суміжності ефективність може бути порядку $O((n + m) \log n)$.

Алгоритм Дейкстри не є універсальним для всіх графових задач. Вибір алгоритму залежить від наявності від'ємних ваг, необхідності знаходити шляхи між однією або всіма парами вершин, розміру графа та його щільності.

Алгоритм Беллмана-Форда дозволяє працювати з графами, що можуть містити ребра з від'ємними вагами. Його часова складність становить $O(nm)$. Алгоритм також дозволяє виявляти від'ємні цикли.

Алгоритм Флойда-Воршелла призначений для знаходження найкоротших відстаней між усіма парами вершин. Його класична складність становить $O(n^3)$.

Отже, вибір алгоритму має здійснюватися на основі математичних властивостей конкретної задачі.

Для розріджених графів, де m значно менше n^2, другий підхід може мати суттєві переваги.

Це демонструє принципову тезу дослідження: ефективність алгоритму визначається взаємодією алгоритмічної стратегії, структури даних та властивостей графа.

Іншою важливою задачею теорії графів є побудова мінімального кістякового дерева.

Нехай задано зв'язний неорієнтований зважений граф $G = (V, E, W)$. Кістяковим деревом називається підграф, який містить усі вершини графа, є зв'язним та не містить циклів.

Якщо сума ваг його ребер мінімальна серед усіх можливих кістякових дерев, таке дерево називається мінімальним кістяковим деревом.

Задача має важливе практичне значення. Наприклад, якщо необхідно з'єднати всі населені пункти транспортною мережею з мінімальною загальною довжиною доріг, задача може бути сформульована як пошук мінімального кістякового дерева.

Для її розв'язання широко використовуються алгоритми Крускала та Прима.

Алгоритм Крускала розглядає ребра у порядку зростання їх ваги та додає чергове ребро, якщо його включення не створює цикл.

Алгоритм Прима починає з довільної вершини та поступово розширює дерево, щоразу додаючи найменше ребро, яке з'єднує вже побудовану частину з новою вершиною.

Важливо розмежувати дві задачі: найкоротший шлях – пошук оптимального маршруту між вершинами; мінімальне кістякове дерево – побудова мінімальної мережі, яка забезпечує зв'язність усіх вершин.

У складних мережах окремі вершини можуть мати принципово різне значення. Наприклад, у транспортній мережі деякі вузли можуть бути основними центрами переміщення. У комп'ютерній мережі окремі сервери можуть забезпечувати зв'язок між великою кількістю інших вузлів.

Для математичної оцінки ролі вершин використовуються показники центральності.

Найпростішою є ступенева центральність: $C_D(v) = deg(v)$. Вершина з великим степенем має багато безпосередніх зв'язків.

Центральність за близькістю враховує відстані від заданої вершини до інших вершин: $C_C(v) = (n-1) \,/\, \Sigma\, d(v,u)$, де сума береться за всіма u, відмінними від v.

Ще один важливий показник – центральність за посередництвом. Вона характеризує, наскільки часто певна вершина входить до найкоротших шляхів між іншими вершинами:

$$C_B(v) = \Sigma\, [\sigma_{st}(v) \,/\, \sigma_{st}],$$

де σ_{st} – кількість найкоротших шляхів між s та t, а $\sigma_{st}(v)$ – кількість таких шляхів, що проходять через v.

Високе значення цього показника може свідчити про стратегічне значення вершини для функціонування мережі.

Таким чином, аналіз центральності дозволяє перейти від простого питання про наявність вершин до визначення найбільш значущих елементів мережі.

Ще одним напрямом сучасного аналізу графів є виявлення внутрішньої структури мережі.

Якщо граф містить групи вершин, між якими існує значно більше зв'язків, ніж із вершинами інших груп, такі групи можуть розглядатися як кластери або спільноти.

Задача виявлення кластерів має велике значення для аналізу соціальних мереж, інформаційних систем, транспортних мереж, біологічних систем та мереж взаємодії.

У простому випадку кластер можна визначити як підмножину $C \subseteq V$, для якої кількість внутрішніх зв'язків є високою, а кількість зовнішніх – відносно низькою.

Одним із поширених критеріїв оцінювання структури спільнот є модульність. Вона оцінює, наскільки кількість зв'язків усередині виділених груп перевищує очікувану кількість зв'язків у відповідній випадковій моделі.

Виявлення кластерів дозволяє отримати додаткову інформацію про структуру мережі, яку неможливо отримати лише за кількістю вершин та ребер.

Зв'язність є фундаментальною властивістю графової мережі.

Для неорієнтованого графа зв'язність означає існування шляху між будь-якою парою вершин. Якщо граф не є зв'язним, він розпадається на компоненти:

$$G = G_1 \cup G_2 \cup \ldots \cup G_k .$$

Визначення компонент зв'язності може здійснюватися за допомогою BFS або DFS. У найпростішому випадку вибирають невідвідану вершину, виконують BFS або DFS, усі досягнуті вершини утворюють одну компоненту, після чого процедура повторюється для наступної невідвіданої вершини.

Для списку суміжності загальна складність такого підходу становить $O(n + m)$.

Аналіз зв'язності має не лише теоретичне, а й практичне значення. Якщо в транспортній мережі видалення певної дороги призводить до розділення мережі на компоненти, така дорога може бути критично важливою. Аналогічно,

у комп’ютерній мережі відмова окремого вузла або каналу може спричинити втрату зв’язності.

Тому дослідження зв’язності безпосередньо пов’язане із задачами надійності та стійкості мереж.

Класичні алгоритми BFS, DFS, Дейкстри, Прима та Крускала залишаються фундаментом графового аналізу. Проте сучасні мережі характеризуються значно більшими розмірами та складнішою структурою, що потребує розвитку нових алгоритмічних підходів.

Одним із напрямів є паралельна обробка графів. Якщо мережа містить мільйони вершин і ребер, послідовне виконання алгоритмів може вимагати значного часу. Тому частину операцій можна розподіляти між декількома обчислювальними ядрами або вузлами.

Інший напрям – динамічний аналіз графів. У реальних системах структура мережі часто змінюється: $G^0 \to G^1 \to G^2 \to \ldots \to G$. До мережі можуть додаватися нові вершини та ребра, а існуючі зв’язки можуть змінюватися або видалятися.

Тому замість повторного виконання алгоритму для всього графа доцільно використовувати методи, здатні оновлювати результат після локальних змін.

Ще одним перспективним напрямом є поєднання теорії графів із методами машинного навчання. Особливе місце займають графові нейронні мережі, призначені для роботи з даними, представленими у вигляді графів.

Графові нейронні мережі дозволяють враховувати як характеристики окремих вершин, так і інформацію про їх сусідів та структуру зв’язків. Це відкриває можливості для прогнозування властивостей вершин, прогнозування ребер, класифікації графів та прогнозування зв’язків.

Таким чином, сучасна інноваційність графового аналізу полягає не у відмові від класичних математичних алгоритмів, а в їх інтеграції з новими обчислювальними технологіями.

Для цілей цього дослідження доцільно розглядати ефективність алгоритму як багатокомпонентну характеристику.

У найпростішому випадку можна визначити $E = f(T, M, Q)$, де T – час виконання, M – використання пам'яті, Q – якість отриманого результату.

Для задач точного пошуку найкоротшого шляху критерій Q може характеризувати коректність отриманої відстані. Для оптимізаційних задач можна використовувати відносну якість рішення: $Q = F(P_alg) / F(P^*)$, де P_alg – маршрут, отриманий алгоритмом, а P^* — оптимальний маршрут.

Якщо $Q = 1$, отриманий маршрут є оптимальним.

Такий підхід дозволяє досліджувати не лише теоретичну складність, але й практичну поведінку алгоритмів.

Для експериментального дослідження доцільно змінювати n, m, ρ та інші характеристики графа, після чого вимірювати $T(n, m, \rho)$ і $M(n, m, \rho)$. Це дозволить побудувати залежності часу виконання від кількості вершин, кількості ребер та щільності графа, а також залежність використання пам'яті від його розміру.

Таблиця 2

Порівняння BFS та DFS

Характеристика	BFS	DFS
Стратегія	у ширину	у глибину
Основна структура	черга	стек / рекурсія
Складність	O(n + m)	O(n + m)
Найкоротший шлях у незваженому графі	так	ні, не гарантує
Пошук циклів	так	так
Топологічне сортування	не є основним методом	так
Пошук компонент	так	так
Побудова рівнів	так	ні

Таблиця 3

Порівняння алгоритмів найкоротших шляхів

Алгоритм	Основна задача	Від'ємні ваги	Орієнтовна складність
Дейкстри	від однієї вершини	ні	$O((n + m) \log n)$
Беллман–Форд	від однієї вершини	так	$O(nm)$
Флойд–Воршелл	між усіма парами	Так	$O(n^3)$

3. Математичне моделювання мережевих систем.

Сучасні технічні, транспортні, інформаційні, соціальні та логістичні системи характеризуються великою кількістю взаємопов'язаних елементів, між якими існують різноманітні відношення. У таких умовах традиційний підхід до аналізу окремих елементів системи часто виявляється недостатнім, оскільки функціонування кожного елемента залежить від його взаємодії з іншими елементами.

Одним із найбільш ефективних математичних інструментів дослідження таких систем є теорія графів. Графова модель дозволяє абстрагуватися від другорядних характеристик об'єкта та зосередитися на його структурі, зв'язках і способах взаємодії між складовими.

У загальному випадку мережеву систему можна представити графом $G = (V, E)$, де V – множина вершин, що відповідають об'єктам системи, а E – множина ребер, що описують зв'язки між ними.

Вершини можуть представляти населені пункти, транспортні вузли, сервери, комп'ютери, підприємства, склади, користувачів, комунікаційні центри або освітні установи. Ребра можуть описувати транспортні маршрути, канали зв'язку, інформаційні потоки, фінансові взаємодії, соціальні зв'язки, логістичні переміщення або технологічні залежності.

Для більш детального представлення мережі до графа вводиться функція ваг w: $E \to R$. Тоді отримуємо зважений граф $G = (V, E, w)$. Вага ребра може мати різну інтерпретацію залежно від предметної області.

У транспортній мережі w_{ij} може відповідати довжині маршруту l_{ij}, часу переміщення t_{ij} або вартості c_{ij}. У комп'ютерній мережі вага може характеризувати затримку передавання τ_{ij}. Отже, одна формальна структура може використовуватися для дослідження різних критеріїв функціонування системи.

Важливою перевагою такого підходу є можливість переходу від якісного опису системи до кількісного аналізу. Наприклад, твердження про важливість транспортного вузла може бути формалізоване показниками ступеня вершини, центральності за близькістю або центральності за посередництвом.

Таким чином, математичне моделювання виконує функцію переходу від реального об'єкта до формалізованої задачі, яку можна розв'язувати алгоритмічними методами.

Побудова математичної моделі мережевої системи передбачає декілька послідовних етапів.

На першому етапі визначається система, яка підлягає аналізу: транспортна мережа міста, комп'ютерна мережа підприємства, система постачання, соціальна мережа або комунікаційна система.

На другому етапі визначаються об'єкти, які будуть представлені вершинами графа: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, де $|V| = n$.

На третьому етапі встановлюється, між якими об'єктами існує безпосередній зв'язок. Множину таких зв'язків позначимо: $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$,

де $|E| = m$.

На четвертому етапі визначається напрямок зв'язків. Якщо взаємодія є симетричною, використовується неорієнтований граф. Якщо взаємодія має напрямок $v_i \to v_j$, використовується орієнтований граф.

На п'ятому етапі задаються ваги w_{ij}, які можуть представляти відстань, час, вартість, пропускну здатність, ризик або інший параметр.

На шостому етапі формується цільова функція. Наприклад, задача пошуку оптимального маршруту може мати вигляд $\min \Sigma(i,j) \in P\ w_{ij}$.

На сьомому етапі формуються обмеження. Наприклад, $x_{ij} \in \{0,1\}$, де $x_{ij} = 1$, якщо ребро використовується, і $x_{ij} = 0$ в іншому випадку. Для потокових задач можуть задаватися обмеження $f_{ij} \leq c_{ij}$.

Отже, математична модель може бути представлена як задача оптимізації: знайти x, таке, що $F(x) \to min$ при виконанні заданої системи обмежень.

Однією з найбільш наочних сфер застосування теорії графів є транспортні мережі. Транспортну систему можна представити орієнтованим або неорієнтованим графом $G_T = (V_T, E_T)$.

Вершинами можуть бути міста, перехрестя, станції, вокзали, аеропорти, порти та транспортні термінали. Ребрами є дороги, залізничні колії, авіамаршрути або інші транспортні сполучення.

Кожному ребру можна поставити у відповідність набір параметрів $e_{ij} = (l_{ij},\ t_{ij},\ c_{ij},\ r_{ij})$, де l_{ij} – довжина, t_{ij} – час переміщення, c_{ij} – вартість, r_{ij} – рівень ризику.

Якщо головним критерієм є мінімальна довжина маршруту, якщо мінімізується час, то позначимо: $min\ t_e$.

Якщо необхідно врахувати одночасно час та вартість, можна сформувати інтегральний критерій $F(P) = \alpha \sum_{e \epsilon P} t_e + \sum_{e \epsilon P} c_e$,

де P – маршрут (шлях) у графі;

$e \in P$ – ребра, які входять до маршруту Р;

t_e – час проходження або використання ребра е;

c_e – т вартість проходження ребра е;

$\alpha \geq 0$ – коефіцієнт важливості часу;

$\beta \geq 0$ – коефіцієнт важливості вартості;

$F(P)$ – загальна оцінка маршруту.

Такий підхід дозволяє моделювати ситуації, коли найкоротший маршрут не обов'язково є найшвидшим або найдешевшим.

Однією з основних задач транспортного моделювання є пошук оптимального маршруту. Нехай задано початкову вершину $s \in V$ та кінцеву $t \in V$.

Потрібно знайти шлях $P = (v_0, v_1, \dots, v_k)$, для якого $v_0 = s$ і $v_k = t$.

Якщо кожному ребру відповідає вага w_{ij}, довжина маршруту визначається $W(P) = \sum_{r=0}^{k=1} w(v_r, v_{r+1})$,

де $P = (v_0, v_1, \dots, v_k)$ – маршрут;

v_0 – початкова вершина;

v_k – кінцева вершина;

v_r – поточна вершина маршруту;

(v_r, v_{r+1}) – ребро між двома послідовними вершинами;

$w(v_r, v_{r+1})$ – вага цього ребра;

k – кількість ребер маршруту;

$W(P)$ – загальна вага маршруту.

Задача найкоротшого маршруту має вигляд $P^* = arg \min_{P \epsilon P(s,t)} W(P)$,

де $P(s,t)$ – множина всіх допустимих шляхів від s до t.

Ця модель є базовою для навігаційних систем. Проте в реальних умовах транспортна мережа є динамічною. Значення w_{ij} може змінюватися залежно від часу доби, погодних умов, заторів або аварій.

Тоді вагу доцільно розглядати як функцію часу: $w_{ij} = w_{ij}(t)$. У такому випадку оптимальний маршрут також залежить від моменту початку руху: $P^* = P^*(t_0)$. Це переводить задачу в область динамічної маршрутизації.

Інформаційні мережі є важливим класом систем, для яких природною математичною моделлю є граф. Нехай G_I=(V_I,E_I) – інформаційна мережа.

Вершинами можуть бути комп'ютери, сервери, маршрутизатори, комутатори, точки доступу та центри обробки даних. Ребрами є канали передавання даних.

Для кожного каналу можна визначити e_{ij}=($b_{ij}, \tau_{ij}, p_{ij}$), де b_{ij} – пропускна здатність, τ_{ij} – затримка, p_{ij} – ймовірність відмови.

Задача пошуку маршруту може полягати у мінімізації сумарної затримки: $\min_{P} \sum_{e \in P} \tau_e$).

Якщо головним критерієм є максимальна пропускна здатність, задача може бути сформульована як задача пошуку максимального потоку. Нехай f_{ij} – потік через канал, а c_{ij} – його пропускна здатність. Тоді $0 \leq f_{ij} \leq c_{ij}$.

Для проміжної вершини виконується закон збереження потоку: $\sum f_{ji} = \sum f_{ij}$. Ця математична модель лежить в основі задач маршрутизації та оптимізації інформаційних потоків.

Логістичні системи характеризуються переміщенням матеріальних потоків між постачальниками, складами, розподільчими центрами та споживачами. Графова модель логістичної системи може бути представлена G_L=(V_L, E_L).

Вершини можуть відповідати виробникам, складам, логістичним центрам, магазинам та кінцевим споживачам. Ребра описують можливі транспортні зв'язки.

Нехай x_{ij} – кількість продукції, що перевозиться від об'єкта i до об'єкта j. Тоді транспортна задача може бути записана як: $min \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij}$.

За умови $\sum_j x_{ij} = a_i$, де a_i – обсяг продукції, доступний у пункті постачання і, та $\sum_i x_{ij} = b_j$, де b_j – потреба пункту призначення j. Додатково $x_{ij} \geq 0$.

Таким чином, задача логістичної оптимізації перетворюється на математичну задачу лінійного програмування.

Соціальні мережі є прикладом складних мереж, у яких вершини представляють людей або організації, а ребра – відносини між ними.

Найпростішою моделлю є $G_S = (V_S, E_S)$. Якщо зв'язок між двома користувачами є взаємним, використовується неорієнтований граф. Якщо зв'язок має напрямок, наприклад підписка одного користувача на іншого, використовується орієнтований граф $u \to v$.

Для соціальної мережі можуть бути визначені показники $deg(v)$, $C_C(v)$ та $C_B(v)$. Вони дозволяють визначити найбільш активних користувачів, центральні елементи та користувачів, які можуть відігравати роль посередників між різними групами.

Особливо цікавим є виявлення спільнот. Нехай $V = C_1 \cup C_2 \cup \ldots \cup C_k$, де C_i – окремі групи користувачів. Задача полягає у визначенні такого розбиття, за якого внутрішня щільність зв'язків у межах C_i є високою, а кількість зв'язків між різними групами – відносно малою.

Це дозволяє математично досліджувати процеси формування соціальних груп та поширення інформації.

Комунікаційні мережі забезпечують передавання інформації між різними елементами системи. Їх можна представити графом $G_\text{C} = (V_\text{C}, E_\text{C})$. .

Кожен канал може характеризуватися пропускною здатністю c_{ij}, затримкою τ_{ij} та надійністю p_{ij}.

Для маршруту $P = (v_0, v_1, \ldots, v_k)$ можна визначити сумарну затримку

$$T(P) = \sum_{i=0}^{k-1} \tau_{v_i v_{i+1}} .$$

Надійність маршруту за незалежності каналів може бути оцінена $R(P) = \prod_{e \in P} r_e$.

Тоді можна поставити задачу: $max\, R(P)$ або комбіновану задачу $min(\alpha T(P) - \beta R(P))$. Таким чином, математична модель дозволяє врахувати одночасно декілька характеристик комунікаційної системи.

Реальні мережеві задачі рідко мають лише один критерій оптимальності. Для транспортної системи одночасно необхідно враховувати довжину маршруту, час переміщення, вартість та безпеку. Для інформаційної мережі важливими можуть бути затримка, пропускна здатність, надійність та кількість проміжних вузлів.

Тому доцільно використовувати багатокритеріальну модель $F(P) = \alpha_1 F_1(P) + \alpha_2 F_2(P) + \cdots + \alpha_k F_k(P)$, де $\alpha_i \geq 0$ — вагові коефіцієнти критеріїв.

За умови $\sum_{i=1}^{k} \alpha_i = 1$ отримуємо нормовану систему ваг. Наприклад, $F(P) = 0{,}5T(P) + 0{,}3C(P) + 0{,}2R(P)$. Така модель дозволяє отримати компромісний розв'язок.

Використання вагових коефіцієнтів потребує обґрунтування, оскільки їх вибір може суттєво вплинути на кінцевий результат. Тому доцільно використовувати аналіз чутливості.

Нехай $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_k)$. Тоді досліджується, як зміна α_і впливає на оптимальний маршрут $P^* = P^*(\alpha)$. Якщо невеликі зміни коефіцієнтів призводять до значної зміни рішення, модель є чутливою до вибору критеріїв.

Нехай задано мережеву систему $G = (V, E)$. Для кожного ребра визначено набір параметрів $w_e = (w_e^1, w_e^2, \ldots, w_e^k)$. Необхідно визначити оптимальну підмножину ребер або маршрут P, який мінімізує цільову функцію.

$$F(P) = \sum_{e \in P} (\alpha_1 w_e^1 + \alpha_2 w_e^2 + \cdots + \alpha_k w_e^k).$$

За наявності обмежень задача набуває вигляду $\min_P \mathrm{F(P)}$ за умов $P \in P$, $x_e \in \{0,1\}$, $f_e \leq c_e, T(P) \leq T_{max}$.

Тут P – допустимий маршрут, x_e – ознака використання ребра, f_e – потік через ребро, c_e – пропускна здатність, T_{max} – допустимий час.

Така постановка є універсальною та може адаптуватися до різних типів мереж.

Для подальшого дослідження доцільно розглянути бінарні змінні x_{ij}, де $x_{ij} = 1$, якщо ребро (i, j) входить до маршруту, і $x_{ij} = 0$ в іншому випадку.

Тоді довжина маршруту $L = \sum_{(i,j)\in E} l_{ij} x_{ij}$. Задача мінімізації довжини має вигляд $min\ L$.

Якщо необхідно мінімізувати час, маємо $min\ T = \sum_{(i,j)\in E} t_{ij} x_{ij}$. Для врахування вартості: $min\ C = \sum_{(i,j)\in E} c_{ij} x_{ij}$.

У багатокритеріальній моделі $F = \alpha L + \beta T + \gamma C$.

Ця модель є зручною для проведення обчислювального експерименту, оскільки можна змінювати значення параметрів і досліджувати отримані маршрути.

Інноваційність запропонованого підходу полягає у переході від розгляду окремого алгоритму до комплексної математичної моделі мережевої системи.

Традиційний підхід часто передбачає постановку конкретної задачі: знайти найкоротший шлях між двома вершинами. Проте для сучасної мережі цього недостатньо.

Доцільно розглядати одночасно $G = (V, E, W)$, структурні характеристики графа (n, m, ρ), алгоритмічні характеристики $T(n, m)$, $M(n, m)$ та якість отриманого рішення Q.

У такому випадку ефективність алгоритму можна представити функцією $E = f(n, m, \rho, T, M, Q)$, де n – кількість вершин, m – кількість ребер, ρ – щільність графа, T – час виконання, M – використання пам'яті, Q – якість результату.

Це дозволяє сформувати інтегровану модель оцінювання ефективності алгоритмів мережевого аналізу.

Саме така модель є перспективною для подальшого дослідження, оскільки дозволяє не просто визначити оптимальний маршрут, а встановити, за яких характеристик мережі конкретний алгоритм є найбільш ефективним.

Важливим аспектом математичного моделювання є врахування структурних властивостей графа.

Два графи можуть мати однакову кількість вершин $|V_1| = |V_2|$, але суттєво відрізнятися за кількістю ребер $|E_1| \neq |E_2|$, Відповідно, алгоритм може демонструвати різний час виконання.

Однією з основних характеристик є щільність графа. Для неорієнтованого графа без петель максимальна кількість ребер становить $m_{max} = \frac{n(n-1)}{2}$.

Коефіцієнт щільності можна визначити $\rho = \frac{2m}{n(n-1)}$. Якщо $\rho \to 0$, граф є розрідженим; якщо $\rho \to 1$, граф є щільним.

Ця характеристика має безпосередній вплив на вибір способу представлення графа та алгоритмічну ефективність.

Для розріджених графів доцільним є використання списків суміжності. Для щільних графів у деяких задачах може бути ефективною матриця суміжності.

Таким чином, математичне моделювання дозволяє пов'язати: структуру графа → спосіб представлення → алгоритм → ефективність.

Для практичної перевірки запропонованих математичних моделей доцільно сформувати набір графів різної розмірності.

Наприклад, $n \in \{100,500,1000,5000,10000\}$. Для кожного значення n можна сформувати графи різної щільності: $\rho \in \{0{,}01;\ 0{,}05;\ 0{,}10;\ 0{,}50\}$.

Для кожного графа виконуються відповідні алгоритми і фіксуються: T_{BFS}, T_{DFS} та T_D, де T_{BFS} – час виконання BFS, T_{DFS} – час виконання DFS, T_D – час виконання алгоритму Дейкстри.

Додатково можуть вимірюватися M_{BFS}, M та M_D.

Результати експерименту доцільно представити у вигляді таблиць і графіків. Це дозволить перевірити теоретичні положення, сформульовані у попередніх розділах.

Таблиця 4

Загальна схема експерементального дослідження

	Кількість вершин	Кількість ребер	Щільність	Алгоритм	ас, мс	Пам'ять, Mb
	100	…	0,01	BFS		…
	100	…	0,01	DFS		…
	500	…	0,05	BFS		…
	500	…	0,05	DFS		…
	1000	…	0,10	Dijkstra		…

Математичне моделювання мережевих систем має широке практичне значення.

У транспортній сфері воно дозволяє визначати оптимальні маршрути, аналізувати завантаження мережі, визначати критичні транспортні вузли, оцінювати наслідки перекриття доріг та оптимізувати транспортні потоки.

В інформаційних мережах моделі використовуються для маршрутизації даних, оптимізації потоків, визначення вузлів із високим навантаженням, оцінювання надійності та виявлення критичних каналів.

У логістиці оптимізується розподіл вантажів, визначаються оптимальні маршрути, мінімізуються транспортні витрати та планується структура складської мережі.

У соціальних мережах виявляються спільноти, визначаються центральні користувачі, аналізується поширення інформації та досліджуються структурні властивості мережі.

Таким чином, математична модель виступає універсальним інструментом, який дозволяє досліджувати різні за природою системи за допомогою єдиного математичного апарату.

3. Перспективи розвитку інноваційних графових методів.

Подальший розвиток графових методів безпосередньо пов'язаний із технологіями штучного інтелекту. Якщо класичний алгоритм працює із заданим графом і фіксованими вагами, то інтелектуальні методи можуть

автоматично виявляти закономірності, прогнозувати зміни та адаптуватися до нових даних.

У реальних системах доцільно розглядати динамічний граф $G(t) = (V(t), E(t), W(t))$, оскільки структура мережі та ваги її зв'язків можуть змінюватися в часі. Методи навчання на графах спеціально розробляються для використання структурної інформації та взаємозв'язків між об'єктами *(Hamilton et al., 2017).*

Перспективним є поєднання математичного алгоритму оптимізації з моделлю штучного інтелекту: модель прогнозує параметри мережі, після чого класичний алгоритм знаходить допустиме оптимальне або наближено оптимальне рішення.

Машинне навчання дозволяє автоматично виявляти закономірності у великих масивах мережевих даних. Для графових даних завдання можуть включати класифікацію вершин, прогнозування зв'язків, виявлення аномалій та отримання низьковимірних представлень графа *(Hamilton et al., 2017).*

Індуктивні методи, зокрема GraphSAGE, будують представлення вузлів на основі їхніх ознак і локального оточення, що дає можливість працювати з новими вершинами та мережами *(Hamilton et al., 2017).*

Для прикладної оптимізації це означає можливість прогнозувати майбутні ваги ребер або стани мережі, а потім передавати прогнозовані значення традиційному алгоритму маршрутизації

Значна частина сучасних даних має мережеву структуру: соціальні взаємодії, транспортні переміщення, інформаційні комунікації та зв'язки між об'єктами. Теорія мереж дозволяє досліджувати такі системи через структуру вершин і ребер *(Newman, 2010).*

Для великих графів особливого значення набувають масштабовані алгоритми, розподілене оброблення та ефективне представлення даних. Сучасні дослідження графових нейронних мереж також підкреслюють проблему ефективного обчислення на великих і розріджених графах *(Abadal et al., 2021).*

Перспективним є потокове оброблення, коли аналіз виконується в міру надходження нових даних, а не після повного накопичення інформації.

Графові бази даних орієнтовані на безпосереднє зберігання об'єктів та зв'язків між ними. Це є природним представленням для систем, у яких основну інформаційну цінність становлять взаємозв'язки.

Застосування графового підходу є перспективним для соціальних мереж, систем рекомендацій, управління знаннями, кібербезпеки та логістики. Мережевий підхід також забезпечує єдину математичну основу для аналізу різних типів систем *(Newman, 2010).*

Graph Neural Networks є класом моделей машинного навчання, які безпосередньо враховують структуру графа. У GNN представлення вершини може формуватися на основі її власних ознак та інформації від сусідніх вершин *(Kipf, Welling, 2017; Zhou et al., 2020).*

Сучасні огляди підкреслюють широке застосування GNN для класифікації вузлів, прогнозування зв'язків і аналізу графів, а також наявність відкритих проблем масштабованості та узагальнення ().

Інтелектуальна маршрутизація передбачає вибір маршруту на основі поточного та прогнозованого стану мережі. У класичній постановці ваги ребер задані, тоді як у прогнозно-оптимізаційній моделі вони можуть визначатися як $w_{ij}(t) = f_\theta\big(X(t)\big)$, де $w_{ij}(t)$ – прогнозована вага ребра (i,j) у момент часу t, $X(t)$ – вектор поточного стану мережі, а f_θ – модель прогнозування з параметрами θ.

Тоді маршрут визначається як $P^*(t) = arg\ \min_P \sum_{(i,j)\in P} f_\theta\,(X(t), i, j)$. Машинне навчання може оцінювати f_θ, а графовий алгоритм – знаходити маршрут.

Перспективним є поєднання GNN із класичними алгоритмами оптимізації, оскільки нейронна модель враховує структуру мережі, а оптимізаційний модуль забезпечує формальне врахування обмежень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на формування єдиної математико-інтелектуальної моделі мережевих систем.

Першим напрямом є розроблення динамічних графових моделей. Другим – створення гібридних алгоритмів, які поєднуватимуть теорію графів, математичну оптимізацію та машинне навчання.

Третім напрямом є автоматичний вибір алгоритму залежно від параметрів мережі. Четвертим – використання GNN для прогнозування ваг ребер та інших характеристик мережі.

Перспективним є створення програмного комплексу, який завантажує граф, аналізує його характеристики, прогнозує параметри, вибирає метод оптимізації та проводить порівняльний експеримент.

Важливим напрямом залишається пояснюваність інтелектуальних моделей. Для наукових та інженерних систем важливо не лише отримати рішення, а й обґрунтувати фактори, які призвели до його вибору.

Висновок. У розділах досліджено сучасні математичні підходи до моделювання, аналізу та оптимізації складних мережевих систем на основі методів теорії графів, алгоритмічного аналізу, математичної оптимізації та технологій штучного інтелекту. Проведене дослідження підтвердило, що графова модель є універсальним математичним інструментом для формалізації систем, у яких функціонування окремих елементів визначається структурою взаємозв’язків між ними. Такий підхід може застосовуватися до транспортних, інформаційних, логістичних, комунікаційних та інших мережевих систем.

Систематизовано основні математичні характеристики графів та показано їх значення для дослідження структури мереж. Особливу увагу приділено зваженим графам, у яких вага ребра може інтерпретуватися як довжина, час проходження, вартість, ризик або інший параметр функціонування мережі. На цій основі сформульовано математичну постановку задачі пошуку оптимального маршруту та показано, що вибір оптимального шляху безпосередньо залежить від визначеного критерію ефективності.

Проаналізовано алгоритмічні методи дослідження графів, зокрема алгоритми обходу, пошуку шляхів, визначення зв'язності та структурних характеристик мереж. Показано, що одна й та сама графова модель може бути використана для розв'язання різних за змістом задач: пошуку найкоротшого маршруту, визначення центральних вершин, побудови оптимальної мережевої структури, аналізу зв'язності та виявлення структурно значущих компонентів. При цьому вибір алгоритму має визначатися не лише розміром і структурою графа, а й характером поставленої задачі.

Важливим результатом дослідження є обґрунтування необхідності структурного аналізу мереж поряд із безпосереднім пошуком оптимальних шляхів. Розглянуто діаметр, радіус та показники центральності вершин, зокрема степеневу центральність, центральність за близькістю та центральність за посередництвом. Ці характеристики дають можливість визначати найбільш значущі вузли мережі, оцінювати її компактність та виявляти вершини, що мають стратегічне значення для передачі потоків або забезпечення зв'язності.

Запропоновано розглядати ефективність алгоритму не лише через якість отриманого рішення, а як сукупність кількох характеристик: якості рішення, часу виконання, використання пам'яті та масштабованості. Такий підхід дозволяє перейти від простого порівняння алгоритмів до **комплексного оцінювання їхньої ефективності** та створює передумови для адаптивного вибору методу залежно від характеристик конкретної мережевої задачі.

В дослідженні описано використання методів машинного навчання та графових нейронних мереж (Graph Neural Networks, GNN) для аналізу складних мереж. На відміну від традиційних моделей, GNN безпосередньо враховують топологічну структуру графа та взаємодію між сусідніми вершинами. Це створює можливості для класифікації вузлів, прогнозування зв'язків, виявлення структурних закономірностей і прогнозування майбутнього стану мережі.

Таким чином**, інноваційність запропонованого підходу полягає не в заміні класичних математичних методів технологіями штучного інтелекту,**

а в їх інтеграції. Поєднання теорії графів, математичної оптимізації, метаевристичних алгоритмів, машинного навчання та графових нейронних мереж створює основу для переходу від статичного аналізу мереж до адаптивного прогнозно-оптимізаційного управління ними.

Перспективними напрямами подальших досліджень є розроблення динамічних графових моделей, створення гібридних алгоритмів теорії графів та машинного навчання, автоматичний вибір оптимізаційного алгоритму відповідно до характеристик мережі, використання GNN для прогнозування ваг ребер та дослідження інтелектуальної маршрутизації в умовах невизначеності.

Отже, результати дослідження підтверджують, що **інтеграція інноваційних методів теорії графів із математичним моделюванням, оптимізацією та штучним інтелектом є перспективним напрямом розвитку сучасних методів дослідження складних мережевих систем.** Запропонована концепція може бути використана як теоретична та методологічна основа для подальшої розробки інтелектуальних систем аналізу, прогнозування, оптимізації та підтримки прийняття рішень у динамічних мережах.

References:

Zverovich V. (2021) Modern Applications of Graph Theory. Oxford University Press, 2021. DOI: 10.1093/oso/9780198856740.001.0001

van der Grinten A., Angriman E., Meyerhenke H. (2020) Scaling up network centrality computations – A brief overview. it – Information Technology. 2020. Vol. 62, No. 3–4. P. 189–204. DOI: 10.1515/itit-2019-0032

Abadal S., Jain A., Guirado R., López-Alonso J., Alarcón E. (2021) Computing Graph Neural Networks: A Survey from Algorithms to Accelerators. ACM Computing Surveys. 2021. DOI: https://doi.org/10.1145/3477141

Boyd S., Vandenberghe L. Convex (2004) Optimization. Cambridge : Cambridge University Press, 2004. 716 p. DOI: https://doi.org/10.1017/CBO9780511804441

Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. (2022) Introduction to Algorithms. 4th ed. Cambridge, MA : The MIT Press, 2022. 1312 p. URL: https://surl.li/yzqsrm

Deb K. (2001) Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Chichester : John Wiley & Sons, 2001. 536 p. URL: https://surl.lt/jvrmel

Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A. (1996) The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 1996. Vol. 26, No. 1. P. 29–41. DOI: https://doi.org/10.1109/3477.484436

Dorigo M., Birattari M., Stützle T. (2006) Ant Colony Optimization. IEEE Computational Intelligence Magazine. 2006. Vol. 1, No. 4. P. 28–39. DOI: https://doi.org/10.1109/MCI.2006.329691

Hamilton W. L., Ying R., Leskovec J. (2017) Representation Learning on Graphs: Methods and Applications. IEEE Data Engineering Bulletin. 2017. URL: https://arxiv.org/abs/1709.05584

Hamilton W. L., Ying R., Leskovec J. (2017) Inductive Representation Learning on Large Graphs. Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. URL: https://arxiv.org/abs/1706.02216

Kipf T. N., Welling M. (2017) Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks. International Conference on Learning Representations. 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.02907

Newman M. (2010) Networks: An Introduction. Oxford : Oxford University Press, 2010. DOI: https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199206650.001.0001

Veličković P., Cucurull G., Casanova A., Romero A., Liò P., Bengio Y. (2018) Graph Attention Networks. International Conference on Learning Representations. 2018. URL: https://arxiv.org/abs/1710.10903

Wu Z., Pan S., Chen F., Long G., Zhang C., Yu P. S. (2021) A Comprehensive Survey on Graph Neural Networks. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. Vol. 32, No. 1. P. 4–24. DOI: https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386

Zhou J., Cui G., Hu S., Zhang Z., Yang C., Liu Z., Wang L., Li C., Sun M. (2020) Graph Neural Networks: Review of Methods and Applications. AI Open. 2020. Vol. 1. P. 57–81. URL: https://arxiv.org/abs/1812.08434

Zhou Y., Zheng H., Huang X., Hao S., Li D., Zhao J. (2020) Graph Neural Networks: Taxonomy, Advances and Trends. 2020. URL: https://arxiv.org/abs/2012.08752

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-52
UDC 656.61.052:378.147:004:316.346.2

CHAPTER 2.
NON-TECHNICAL COMPETENCIES OF THE SEAFARER AMID THE DIGITAL TRANSFORMATION OF SHIPPING: SOFT SKILLS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND THE GENDER DIMENSION OF STCW CONVENTION REFORM

Olena BAIRAMOVA
Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor,
Acting Head of the Department of Social
and Humanitarian Disciplines, Separate Structural Unit
"Danube Institute of Water Transport of the National
Transport University", (7, Izmailska Street, Izmail, 68601, Ukraine)
bairamova3456@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-2836-7037

Abstract. This chapter examines how digitalisation and the emerging deployment of artificial intelligence in shipping are reshaping the non-technical (soft) competency requirements for seafarers within the ongoing comprehensive review of the STCW Convention and the development of the IMO MASS Code. Building on the human-factor paradigm shift from technical determinism to resilience engineering, the study analyses how communication, situational awareness, decision-making and psychological safety are being redefined for hybrid human–AI bridge and engine-room teams. Particular attention is paid to generative artificial intelligence applications in maritime communication and training feedback and to their implications for competency frameworks under the STCW review. The chapter further investigates whether this technologically driven reconfiguration of seafarer competencies opens a genuine window of opportunity for gender diversity at sea, against the backdrop of the 2024 IMO-WISTA Women in Maritime Survey data showing a decline in the female share of the maritime workforce. It draws on the author's prior research on non-technical competencies and safety culture in maritime education to propose a structured account linking the technological, educational and gender dimensions of seafarer competency development. The chapter argues that without deliberate institutional intervention, digitalisation risks reproducing existing masculine norms of maritime education rather than dismantling them. Practical recommendations are formulated for integrating artificial-intelligence-related and gender-sensitive elements into non-technical competency training programmes at maritime higher education institutions.

Keywords: Bridge Resource Management, autonomous surface ships, automation trust calibration, psychological safety, human factor, maritime education and training, occupational segregation.

Introduction. Contemporary shipping is undergoing a systemic transformation driven by the simultaneous operation of two, at first glance, disparate processes – the technological and the social. Digitalisation, the automation of shipboard operations and the practical deployment of artificial intelligence (AI) technologies are fundamentally reshaping the range of competencies required of the modern maritime professional, while in parallel there is a growing societal and industry demand for gender equality and wider participation by women in maritime careers. The topicality of the subject is reinforced by the fact that, notwithstanding technological progress, the human element remains the principal cause of most maritime casualties: according to the European Maritime Safety Agency, it is implicated in over 80% of investigated incidents at sea, with a substantial proportion of errors attributable specifically to an insufficient level of non-technical (soft) competencies – leadership, teamwork, communication, situational awareness and decision-making *(Bairamova, 2026).*

Tellingly, at the level of the foremost international shipping regulator, the technological and gender dimensions of reform are recognised not as parallel but as interconnected processes. In launching the comprehensive review of the STCW Convention in 2024, the International Maritime Organization (IMO) explicitly grounded its necessity in the fact that progress in digitalisation, automation and emerging technologies is reshaping shipboard operations and the competencies required of seafarers, while at the same time societal change demands greater attention to diversity, gender equality and the growing participation of women in the maritime workforce *(IMO, 2026a)*. This is no mere declaration: the 11th session of the IMO Sub-Committee on Human Element, Training and Watchkeeping *(HTW 11, February 2025)* identified more than 400 gaps in the current Convention, and the target completion date for the reform was subsequently brought forward from 2031–2032 to 2029–2030 (MSC 110 decision, June 2025). Already at the following, 12th session of HTW *(February 2026),* emerging training technologies, cybersecurity, psychological safety, and gender and cultural diversity were considered within a

single package of issues concerning the revision of Chapters II and III of the Convention *(IMO, 2026a)* – that is, precisely the aspects that constitute the subject matter of this study are, for the IMO itself, elements of a single reform rationale rather than separate agenda items.

This study builds on the author's prior work, which examined the evolution of safety science paradigms – from technical determinism to resilience engineering – and the role of Reason's model of organisational accidents in shaping non-technical competencies within the STCW framework *(Bairamova, 2026)*, as well as the political and ethical dimensions of psychological safety within the safety culture of maritime organisations *(Bairamova, 2025a)* and a philosophical account of the dialectic of hard and soft skills in twenty-first-century educational paradigms *(Bairamova, 2025b)*. A logical continuation of this line of enquiry is an analysis of precisely how the digital transformation of shipping is redefining the content and priority of non-technical competencies, and what implications this holds for the gender balance of the maritime profession.

The topicality of this study also has a direct Ukrainian dimension. According to a report by BIMCO and the International Chamber of Shipping (ICS), Ukraine supplies approximately 4% of the world's seafarers (76,442 individuals), and together with Russia accounts for 14.5% of the global shipping workforce *(ICS, 2021)*; this places the training of non-technical competencies among Ukrainian seafarers within a context of interest that is economically significant for the country, not merely academic. It is notable that these processes are unfolding against the backdrop of a full-scale war that has directly affected the maritime infrastructure of the region in which the author's institution is located: the Danube ports of Izmail and Reni, which since the 2022 blockade of the Black Sea have become one of Ukraine's key alternative export corridors, are subject to regular missile and drone strikes that have damaged grain terminals, the passenger terminal and the seafarers' club building at the Port of Izmail *(NorthStandard, 2025)*; as recently as November 2025, a drone strike on the Port of Izmail damaged port barges and left more than 32,500 residents

of the city without electricity *(Wikipedia, 2025)*. This lends the study of non-technical competencies – in particular stress resilience, situational awareness and decision-making under uncertainty – a significance that is not merely theoretical but directly applied for the region.

The aim of this chapter is to provide a comprehensive analysis of the transformation of the non-technical (soft) competencies of the maritime professional in the context of the deployment of artificial intelligence and autonomous shipping, against the backdrop of the comprehensive review of the STCW Convention, and to examine the gender dimension of this transformation.

To achieve this aim, the following objectives have been set:

1) to trace the evolution of requirements for seafarers' non-technical competencies from the 2010 Manila Amendments to the current comprehensive review of the STCW Convention and the development of the Code for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS);

2) to identify the new dimensions of soft skills arising in connection with the deployment of generative AI in shipboard communication, navigation and training;

3) to establish whether the technological transformation of competency requirements opens a genuine window of opportunity for gender equality at sea, or, conversely, risks reproducing entrenched masculine norms of maritime education in a new, "softer" form.

The object of the study is the process by which the non-technical competencies of maritime professionals are formed under conditions of the industry's digital transformation. The subject is the gender-related and technological (AI-associated) factors driving the transformation of the content and priority of soft skills in maritime education. The theoretical and methodological basis comprises the human-factor concept and models of organisational accidents *(Reason, 1990)*, situation awareness theory *(Endsley, 1995)*, the concept of psychological safety *(Edmondson, 1999)*, together with current IMO regulatory instruments and empirical data from the joint IMO-WISTA survey.

The chapter is structured around three interrelated sections: the first is devoted to the evolution of STCW requirements for non-technical competencies in the context of the comprehensive review of the Convention; the second to the new dimensions of soft skills arising from artificial intelligence and autonomous shipping; and the third to the gender dimension of this transformation.

Section 1. The evolution of requirements for seafarers' non-technical competencies: from the Manila Amendments to the MASS Code. Prior to 2010, the STCW Convention, notwithstanding the competency-based approach introduced by the 1995 amendments, remained focused predominantly on the technical, procedural and navigational competencies of the seafarer – knowledge of equipment, procedures and regulatory requirements. The non-technical aspects of a navigator's work – communication, the distribution of attention within the team, decision-making under stress – held no separate regulatory status and were treated as an implicit, "self-evident" component of professional qualification, one assumed to develop spontaneously through experience rather than through purposeful training. This reflected the broader paradigm of technical determinism in the understanding of safety: an accident was explained chiefly by equipment failure or by a procedural violation on the part of a specific operator, while the deeper, systemic causes – communication breakdowns, coordination errors, deficits in situational awareness – remained outside the regulator's field of vision.

A watershed moment came with the Manila Amendments to the STCW Convention and Code, adopted on 25 June 2010 at a diplomatic conference in Manila and brought into force on 1 January 2012, with full transition to the new qualification requirements from 1 January 2017. Among the changes – the introduction of mandatory ECDIS training, a new "Able Seafarer-Engine" rating, and strengthened measures against fraudulent certification – central to the concerns of this study is the introduction of mandatory training in Bridge Resource Management (BRM) and Engine Resource Management (ERM), together with leadership and teamworking skills at the operational level and leadership and managerial skills at the management

level. For the first time in the Convention's history, non-technical competencies acquired mandatory, legally binding status on a par with purely technical requirements.

Conceptually, BRM/ERM represents a direct borrowing from the aviation concept of Crew Resource Management, developed following a series of air disasters in the 1970s–1980s that were caused not by technical failure but by errors of communication and coordination within the crew. The transfer of this model to shipping reflected a broader paradigm shift in the understanding of the human factor – from the search for a "culpable" operator towards an analysis of the systemic, organisational preconditions of error, a shift theoretically grounded in Reason's model of organisational accidents and the concept of high-reliability organisations. As demonstrated in the author's earlier study, it is precisely this shift – from technical determinism to resilience engineering – that constitutes the methodological foundation of the contemporary understanding of non-technical competencies in maritime education *(Bairamova, 2026)*. A systematisation of the practical components of BRM/ERM – the distribution of attention, the verbalisation of intent, the mutual cross-checking of actions – is presented in the classic work of R. Flin, P. O'Connor and M. Crichton, "Safety at the Sharp End", which remains to this day the conceptual foundation of most BRM training programmes *(Flin, O'Connor, Crichton, 2008)*.

The practical instrument for operationalising BRM/ERM in maritime education has been IMO Model Course 1.22, "Ship Simulator and Bridge Teamwork", first published in 2002 and structured in four parts – a course framework, a course outline and timetable, a detailed teaching syllabus, and an instructor manual *(IMO Model Course 1.22, 2002)*. The course develops in seafarers concrete, operationalised teamworking skills – including the technique of "closed-loop communication", whereby a received order is invariably repeated aloud by the executing party to confirm correct understanding, the distribution of workload among watch members, and the maintenance of shared situational awareness during complex manoeuvres

(Maersk Training, 2026). It is telling that this model course, together with its counterpart for the engine department, is systematically updated in step with the revision of the STCW Convention: updated versions of a number of IMO model courses were approved directly at the HTW 12 session (Section 1) *(PRS, 2026)*, confirming a direct rather than merely declarative link between regulatory revision and the content of seafarers' practical training.

For all their pioneering role, the Manila Amendments established a framework-level rather than a substantively detailed approach to non-technical competencies: the requirement to "undergo training in leadership and teamwork" was not accompanied by detailed learning-outcome descriptors, and assessment of these competencies was largely reduced to completion of a simulator course rather than valid measurement of skill attainment. A decade of practice revealed further gaps: the 2010 amendments made no separate provision for psychological safety as a precondition of effective teamwork, for cybersecurity, or for work with new fuel types and technologies, nor did they anticipate the demand for gender equality and cultural diversity in the maritime profession, which had not yet crystallised at that time. These gaps gave rise to the need for a new, considerably more far-reaching review of the Convention.

In 2024 the IMO initiated a comprehensive review of the STCW Convention and Code – one of the most extensive in the instrument's nearly fifty-year history. It is noteworthy that the IMO itself explicitly grounds the need for this review in the combination of two, at first glance, disparate factors: first, progress in digitalisation, automation and emerging technologies, which is reshaping shipboard operations and the competencies required of seafarers; and second, societal change, which demands greater attention to diversity, gender equality and the growing participation of women in the maritime workforce *(IMO, 2026a)*. This official formulation by the regulator itself constitutes direct empirical confirmation of this chapter's central thesis: the technological transformation of competencies and the gender dimension of the maritime profession are treated by the IMO not as parallel but as interconnected components of a single reform rationale.

The review is being conducted according to a two-phase methodology approved by the Maritime Safety Committee *(MSC 108, May 2024):* Phase 1 entails a systematic review of existing provisions and the identification of gaps, while Phase 2 involves the drafting of corresponding amendments. At the 11th session of the Sub-Committee on Human Element, Training and Watchkeeping (HTW 11, February 2025), Phase 1 was completed and more than 400 gaps were identified in the current text of the Convention – a scale unprecedented in the history of STCW. Under the MSC 110 decision (June 2025), the target completion date for the review was brought forward from the originally planned 2031–2032 to 2029–2030, indicating the regulator's recognition of the urgency of the matter *(IMO, 2026a)*.

Particularly telling for the subject matter of this study is the 12th session of HTW *(February 2026),* at which the gaps in Chapters II (deck department) and III (engine department) of the Convention were addressed. The agenda of this session considered emerging training technologies, cybersecurity, ballast water management, the prevention of violence and harassment, mental health and psychological safety within a single package alongside issues of gender and cultural diversity *(IMO, 2026a)*. More than 160 documents were submitted to HTW 12 by member states and international organisations – a volume and depth of stakeholder engagement significantly exceeding that of previous reviews of the Convention. The fact that the IMO brings together these, at first glance, disparate themes within a single agenda confirms that, for the regulator, the technological transformation of non-technical competencies and gender equality in the maritime profession are not separate topics but components of a single structural transformation of the human element in shipping.

The specific list of discussion items brought before HTW 12 offers substantive insight into the direction of the forthcoming revision of competency requirements. Among the key themes are whether sufficient simulator training time might substitute for part of the seagoing service requirement, whether the scope of ECDIS training meets present-day needs, which new teaching and training methods ought to be

recognised in the revised STCW, and – most relevant to this study – whether the current understanding of leadership reflects the latest aspects of cultural awareness, mental health issues and modes of communication *(DNV, 2026c)*. This last question resonates directly with the conclusion of Section 2 of this study: leadership and teamwork, introduced as non-technical competencies as far back as the 2010 Manila Amendments, themselves require redefinition towards a broader cultural and communicative understanding, rather than the mere addition of further discrete skills. HTW 12 also validated updated versions of several IMO model courses *(PRS, 2026)* – methodological documents that traditionally underpin the development of national training curricula for seafarers, including courses on bridge and engine-room resource management.

It is telling that perceptions of this process among the review's own participants have likewise attracted academic attention. A qualitative study of HTW Sub-Committee delegations' positions on the integration of emerging educational technologies into the comprehensive review of the Convention, combining document analysis with semi-structured interviews with delegates, found that participants in the review perceive opportunities for competency development through advanced simulation-based learning technologies and the expansion of flexible, blended training formats *(Stakeholder Perspectives on the Comprehensive Review, 2025)*. This study also identifies a gap between the nine-year review cycle recommended by Resolution 15 of the STCW Convention itself and the actual delays inherent in international regulatory processes, which deepen the mismatch between training standards and the industry's real needs *(Stakeholder Perspectives on the Comprehensive Review, 2025)*. Separately, HTW 12 outlined a direct trajectory for the development of automation-related competencies: the reduction of manual crew workload is accompanied by increased responsibility for the oversight of automated systems, an understanding of AI-based decision-support tools, and appropriate action in the event of their failure *(IMO's HTW 12, 2026)* – that is, the regulatory process

itself is already outlining precisely the pedagogical content of competencies examined in detail in Section 2 of this study.

Running in parallel with the review of the STCW Convention is a separate, closely related regulatory track – the International Code of Safety for Maritime Autonomous Surface Ships (the MASS Code). On 22 May 2026, at the 111th session of the Maritime Safety Committee (MSC 111), a new, non-mandatory at this stage, goal-based and technology-neutral MASS Code was adopted, entering into force on 1 July 2026 *(IMO, 2026b)*. The Code supplements the SOLAS Convention and other existing IMO instruments, covering those functions of the safe, secure and environmentally sound operation of autonomous ships that have not received adequate regulation within the existing framework.

The key conceptual principle of the MASS Code is the preservation of human accountability even under conditions of remote or autonomous operation: the human master remains responsible for the vessel even where not physically on board, but must retain the technical and organisational capacity to intervene in its operation where necessary *(DNV, 2026a)*. This provision has direct implications for the content of non-technical competencies: situational awareness, communication and decision-making must now function not within a physically co-located ship's team, as in the 2010 BRM/ERM model, but within a distributed system – partly technologically mediated – of "human–autonomous system–human", encompassing the on-board crew (where present) and the operators of a shore-based Remote Operations Centre (ROC). The competency and qualification requirements for personnel – both shipboard crew and ROC operators – are set out in Chapter 15 of the MASS Code ("Human Element"), the finalisation of which has been a priority of the work of the IMO's intersessional MASS working group in 2025–2026 *(IMO, 2026c)*.

The regulatory trajectory of autonomous shipping does not end there: the MASS Code adopted in May 2026 is a non-mandatory instrument intended to launch an Experience-Building Phase, the framework for which is to be developed by MSC 112 in December 2026. A mandatory MASS Code is not expected to be adopted

before 1 July 2030, entering into force on 1 January 2032 *(IMO, 2026c)*. This means that maritime education is already today preparing professionals for a competency paradigm whose regulatory codification will unfold over the coming decade – a circumstance that lends further weight to the case for anticipatory research into the content of non-technical competencies amid digital transformation.

For the Black Sea and Sea of Azov region, the development of the regulatory framework for autonomous shipping carries not merely prospective but immediate safety significance. Owing to the mine threat in the Black Sea (an estimated 150 drifting mines have been neutralised in the area over the past four years alone) and regular missile and drone strikes on port infrastructure *(Maritime Risk International, 2026)*, the physical presence of crew on board or in port constitutes a genuine risk to life with no parallel in the peaceful shipping regions for which the current STCW norms were predominantly designed. In this context, the remote-operation technologies addressed within the MASS Code acquire significance not merely as a tool for improving efficiency or addressing crew shortages, but as a potential means of reducing risk to personnel's lives – the possibility of conducting part of operations from a shore-based remote operations centre physically removed from the conflict zone. This lends the analysis of the MASS Code's competency requirements undertaken in this chapter an additional practical dimension specific to Ukrainian maritime education.

Table 1.

Chronology of the transformation of regulatory requirements for seafarers' non-technical competencies *(2010–2032)*

Period	Regulatory milestone	Implication for non-technical competencies
2010	Manila Amendments to STCW	Mandatory BRM/ERM, leadership and teamworking (operational level), leadership and managerial skills (management level)
2012–2017	Entry into force and transitional period	Gradual transition of the fleet to the new qualification requirements
2024–2025	Comprehensive review of STCW, Phase 1 (HTW 10–11)	Over 400 gaps identified in the current text of the Convention
02.2026	HTW 12, Phase 2 (Chapters I–III)	Psychological safety, cybersecurity, gender and cultural diversity, emerging training technologies – a single package of issues
05.2026	MSC 111: adoption of the MASS Code (non-mandatory)	Chapter 15 "Human Element": competencies of crew and ROC operators
12.2026	MSC 112: Experience-Building Phase framework	Accumulation of practical experience in MASS operation
2029–2030	Target completion of the comprehensive review of STCW	Entry into force of updated non-technical competency requirements
2030–2032	Adoption (2030) and entry into force (2032) of the mandatory MASS Code	Final regulatory consolidation of competencies for hybrid human–machine teams

The evolution traced above – from the framework-level recognition of BRM/ERM in the Manila Amendments, through the far-reaching comprehensive review of the Convention, to the emergence of a separate regulatory track for autonomous shipping – evidences the sustained deepening of the very paradigm shift the author has previously described as the transition from technical determinism to resilience engineering in the understanding of maritime safety *(Bairamova, 2026)*.

Where the 2010 amendments extended the regulator's attention from technology to the individual, and the 2024–2030 comprehensive review extends it from the individual to organisational culture and team diversity, the MASS Code takes the next logical step, extending the concept of the "team" – and hence the subject matter of non-technical competencies – to hybrid human–machine systems. It is precisely the substantive content of this new dimension of soft skills – in connection with generative artificial intelligence, communication automation and trust in autonomous systems – to which the next section of this study is devoted.

Section 2. Artificial intelligence on board and ashore: new dimensions of soft skills. If Section 1 demonstrated that the MASS Code extends the concept of the ship's "team" to a distributed "human–autonomous system–human" system, the logical question follows: with what specific content is the notion of non-technical competency filled within this new configuration? An analysis of the current English-language literature makes it possible to identify at least three interconnected dimensions of the transformation of soft skills brought about by the deployment of artificial intelligence (AI) in shipping: communication automation; trust in autonomous systems and the calibration of trust in their recommendations; and the transformation of the role of emotional intelligence under conditions of human interaction with intelligent systems.

The most empirically documented dimension is that of communication automation. A systematic review and bibliometric analysis of the competencies required for the operation of maritime autonomous surface ships explicitly identifies "Communication Automation skills" through generative AI as a distinct, new category of competency required of future seafarers and remote-operation personnel *(Skills and Competencies for MASS, 2025)*. A telling empirical example is SeaGPT – a chatbot developed by the Singapore-based company Greywing on the basis of GPT-4 technology, which automates the drafting of correspondence and the extraction of relevant information from port agents' replies for individual crew members *(TechCrunch, 2023)*. The practical significance of such tools for shipping lies not

merely in time savings, but in the fact that they alter the very nature of the seafarer's communicative competency: whereas within the 2010 BRM/ERM paradigm communication meant the precise verbal articulation of intent between people sharing a physical space *(Flin, O'Connor, Crichton, 2008)*, it now additionally requires the ability to formulate queries to an AI system, to critically evaluate its generated response, and to detect possible errors of automated translation or summarisation – that is, a new, hybrid variety of communicative literacy.

The second dimension – trust in autonomous systems and the calibration of that trust – follows directly from the key principle of the MASS Code discussed in Section 1: the human master remains responsible for the vessel even under remote operation, but must retain the capacity to intervene in a timely manner. This poses a task for non-technical training no less demanding than traditional situational awareness *(Endsley, 1995)*: to develop in the operator the capacity to trust the recommendations of an autonomous system appropriately – neither too uncritically (the risk of automation bias, whereby the operator disregards personal doubts in favour of system readouts) nor too sceptically (the risk of forgoing the benefits of automation through unwarranted distrust). A recent study of seafarers' perceptions of AI-generated feedback in training, which compared traditional feedback with AI-generated summaries of performance following assessment of compliance with the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs), demonstrates that the very form in which such feedback is presented substantially influences the extent to which seafarers trust its conclusions and regard them as useful for reflective learning *(Toward Personalised Maritime Training, 2026)*. This confirms that trust in AI is not an automatic effect of technological deployment but a discrete competency requiring deliberate cultivation.

The theoretical grounding for understanding this competency is provided by the classic, and still most frequently cited, work in the psychology of human–automation interaction – the article by R. Parasuraman and V. Riley, "Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse", published in 1997. The authors identify

four typical patterns of human interaction with an automated system: use proper (the operator's conscious decision to engage or disengage automation depending on trust, workload and risk assessment); misuse – excessive reliance on automation, leading to a weakening of the operator's own monitoring of the situation and to biased decisions; disuse – the neglect or under-utilisation of automated aids, frequently caused by prior experience of false alarms; and abuse – the automation of functions by system designers without regard to how this will affect the operator's capacity to perform a backup monitoring role *(Parasuraman, Riley, 1997)*. This four-part typology furnishes a precise analytical vocabulary for the pedagogical task outlined above: the training of the maritime professional to work with autonomous systems within the MASS paradigm must deliberately guard against both misuse (excessive trust) and disuse (unwarranted distrust) of automated recommendations, while the designers of shipboard and shore-based decision-support systems must, for their part, take account of the risk of abuse inherent in interface design itself.

Empirical confirmation of the risk of misuse of trust in automation is furnished by a recent study within a systematic review of explainable AI for MASS: although only 82.5% of cadets and 66.6% of experienced navigators reported low trust in automated systems when surveyed, a substantial proportion of them, in actual simulator exercises, continued to trust the readouts of a deliberately compromised (faulty) system *(Misas et al., 2024, cited in Explainable AI for MASS, 2025)*. This gap between declared and actual behavioural trust – "implicit trust", which forms within the simulator environment – constitutes direct empirical confirmation of misuse within Parasuraman and Riley's typology, and demonstrates that the cultivation of appropriate trust in automation cannot be left to independent simulator-based familiarisation with the technology: deliberate pedagogical intervention is required that directly confronts the trainee with the consequences of excessive trust.

The technological infrastructure for such intervention is already taking shape in practice. In spring 2026, the leading manufacturer of maritime simulators, Wärtsilä, brought to market a next-generation simulation platform, NTPRO 7, specifically

designed to prepare crews for the operation of vessels with advanced automation and remote control *(Wärtsilä, 2026)*. In parallel, AI-based training analytics technology is developing: a system devised by researchers for the objective assessment of cadets during simulator training combines eye-tracking and pupil-dilation analysis to determine the focus of attention, speech recognition based on a maritime terminology model, and natural-language processing to assess the correctness of communication, together with the determination of psychological stress from vocal pitch *(AI Meets Maritime Training, 2025)*. This makes it possible to replace an instructor's subjective assessment – for example, when practising BRM/ERM communication protocols – with objective, reproducible metrics of attention, communication and stress resilience that correspond directly to the non-technical competencies examined in this study. A pilot implementation of a fully immersive VR engine-room simulator at the Faculty of Maritime Studies of the University of Rijeka (Croatia), involving 84 students, confirmed that perceived usefulness of the technology is the principal determinant of cadets' willingness to adopt it *(Charting the Future of MET, 2025)* – that is, the pedagogical effect of new training technologies depends not only on their technical sophistication but on how convincingly the institution can demonstrate their practical value.

A further technological direction of growing significance for the formation of non-technical competencies is the use of digital twins in simulator training: a digital twin is a dynamic, real-time 3D model of a specific vessel or its systems, which relays genuine operational data via IoT sensors and telemetry into a physically accurate simulation engine, in contrast to the static, generic 3D models of the previous generation of simulators *(AI and Digital Twins in Maritime Simulation, 2026)*. The application of digital twins in conjunction with AI-adaptive learning makes it possible to transform simulator training from the passive rehearsal of generic scenarios into engagement with the actual behaviour of a specific vessel – an approach of direct relevance to the cultivation of trust in automated systems (Section

2), since the trainee learns to calibrate expectations against genuine, documented behaviour of the automation rather than an abstraction.

A third, most philosophically substantive dimension concerns the transformation of the very concept of emotional intelligence under conditions of human interaction with AI. Within the author's own line of research, this issue is examined in an article devoted to a philosophical reflection on subjectivity in cognitive processes involving emotional and artificial intelligence *(Varypaiev, Bairamova, Silvestrova, 2025)*. Drawing on an analysis of real-world applications of machine-learning and natural-language-processing technologies in business communication (including the platforms Gong and BenchSci, which analyse customers' emotional signals in order to adapt communication style), the authors advance a principled thesis: AI is not an autonomous subject of cognition, since its "emotional sensitivity" consists in the reproduction of algorithmic patterns rather than in the genuine subjective experience of emotion *(Varypaiev, Bairamova, Silvestrova, 2025, drawing on the classic definition of emotional intelligence by Salovey and Mayer, 1990)*. At the same time, the authors emphasise that AI's capacity to simulate emotional sensitivity and to influence human emotional responses gives rise to a distinct ethical problem – the boundary between adaptive personalisation of interaction and manipulative influence over a user's emotional state.

Transposing this conclusion to the maritime context provides a substantive orientation for the transformation of soft skills: if, ashore, artificial emotional-intelligence technologies are already being used to analyse tone of voice, word choice and the context of customer communication *(Varypaiev, Bairamova, Silvestrova, 2025)*, it is entirely realistic to anticipate analogous tools within shore-based Remote Operations Centres (ROC) – for instance, to monitor an operator's psycho-emotional state during a prolonged watch, or to detect early signs of fatigue or stress from voice and text communication data. This means that the non-technical competency of the maritime professional will, in the near future, require not only "classical" emotional

intelligence in the sense of Salovey and Mayer – the capacity to identify, interpret and regulate one's own emotional states and those of colleagues *(Salovey, Mayer, 1990)* – but also a new layer of reflection: an understanding of the boundaries and nature of "pseudo-emotional" interaction with intelligent systems, and the ability to discern when the adaptive behaviour of AI constitutes useful support and when it constitutes a potentially manipulative or misleading device.

A further dimension of non-technical competencies, directly linked to the digital transformation of shipping and already noted in connection with the HTW 12 agenda (Section 1), is cybersecurity awareness as a human, rather than purely technical, factor of protection. According to monitoring by the company Marlink, in the first half of 2024 alone more than 23,400 malware infection attempts were recorded across 1,800 vessels, and in 2025 the number of maritime cyber incidents rose by 103% year on year, with almost half originating from phishing emails *(FMTC Safety, 2026)*. DNV estimates that 97% of cyberattacks employ social-engineering methods – the manipulation of a human being rather than the direct breach of technical systems *(DNV, 2026b)* – which places cybersecurity squarely within the category of non-technical, communicative-psychological competencies rather than purely technical ones. The specific challenge this poses for seafarers is underscored by the fact that traditional annual training formats designed for office-based staff sit poorly with the rhythm of shipboard service: researchers note that up to 90% of acquired knowledge is lost within a few weeks, whereas the interval between training sessions for a seafarer returning from a four-week voyage may be considerably longer *(FMTC Safety, 2026)*. A recent conceptual framework for cultivating cybersecurity awareness among seafarers *(Cultivating Cybersecurity Awareness Among Seafarers, 2025)* explicitly emphasises the need to integrate the specific maritime context – limited satellite bandwidth, rotating watch compositions, shared use of equipment – into awareness programmes, rather than simply transplanting office-based training onto shipboard conditions.

The theoretical and technological dimensions examined above have direct practical application for updating the educational components that develop seafarers' soft skills. Within the mandatory course "Soft Skills for Seafarers", it would be appropriate to introduce a module on the critical – rather than purely instrumental – mastery of generative AI: instead of teaching only the technical operation of tools such as SeaGPT, the course should cultivate skills in calibrating trust in automated recommendations according to the Parasuraman–Riley typology, through practical exercises featuring deliberately embedded automation errors that cadets must learn to detect.

The elective course "Effective Communication in Professional Activity" would benefit from a dedicated module on hybrid communication – interaction not only between people but also with intelligent systems (formulating queries, critically evaluating generated responses, and recognising the boundaries of the "pseudo-emotional" interaction discussed above, drawing on the study by Varypaiev, Bairamova and Silvestrova). Equally relevant is a module on communication under conditions of limited bandwidth and heightened stress – a theme that, for the Danube ports region discussed in the Introduction to this study, is of direct applied rather than merely abstract significance.

The elective course "Leadership and Team Interaction Management (Teambuilding)" would benefit from being updated in light of the direct discussion item brought before HTW 12 (Section 1): whether the current understanding of leadership reflects the latest aspects of cultural awareness, mental health and modes of communication. In practice, this entails extending the course with a module on leadership in distributed human–machine teams – managing a team part of which is physically on board while part is located at a shore-based Remote Operations Centre (ROC) – drawing on the concept of psychological safety *(Edmondson, 1999)*.

Synthesising these three dimensions – communication automation, calibrated trust in autonomous systems, and the transformed role of emotional intelligence – it may be stated that Chapter 15 of the MASS Code, "Human Element", referred to in

Section 1, is being filled with entirely concrete pedagogical content. Preparing the seafarer and the ROC operator to work within a hybrid human–machine team requires extending the traditional roster of BRM/ERM non-technical competencies (leadership, teamwork, situational awareness) with new components: literacy in interacting with generative AI, skills in calibrating trust in automated recommendations, and critical reflection on the limits of the subjecthood and ethics of algorithmically modelled empathy. Yet the technological transformation of competencies does not occur in a vacuum: it is superimposed upon an already existing, deeply entrenched structure of the maritime profession, historically formed as a homosocial, masculine environment. Whether the technologically driven expansion of the soft skills roster opens a genuine window of opportunity for those traditionally excluded from this structure – women, above all – or, conversely, risks reproducing existing barriers in a new, "digital" form, is examined in the next section of this study.

Section 3. The gender dimension of the transformation: digitalisation as a window of opportunity or the reproduction of masculine norms in maritime education. The empirical backdrop for gender analysis is provided by the second joint IMO–Women's International Shipping and Trading Association (WISTA) survey, "Women in Maritime", released in May 2025. The data cover 176,820 women employed in the maritime sector across member states and the private sector in 2024 (compared with 151,979 in 2021), yet their share of the aggregate workforce sample fell from 26% in 2021 to under 19% in 2024 *(IMO, WISTA, 2025)*. In the private sector (excluding seafarers), women constitute only 16% of the workforce, and the situation at sea itself is most acute: women account for a mere 1% of the total number of seafarers employed by the organisations surveyed. It is telling that women already constitute 5% of students in maritime specialisations – meaning that considerably more women enter maritime education than subsequently transition into a maritime career *(IMO, WISTA, 2025)*. This gap between entry into education and transition into the profession is an empirical indicator that barriers for women are

concentrated less at the stage of entry into a maritime education institution than at the stage of transition from training to practice on board – and hence that maritime education and training (MET) itself is the critical point at which effort should be applied.

A theoretical framework for understanding these barriers is provided by the recent study by M. Kitada, C. Barahona-Fuentes and M. Castells-Sanabra, "Masculinities in Maritime Education and Training", published in the journal Maritime Studies in June 2025, based on a mixed-methods design – a review of the academic literature and regulatory documents, interviews with six male lecturers at maritime education institutions, and a survey of 131 students *(Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025)*. Drawing on R. Connell's classic typology, the authors distinguish hegemonic, complicit, subordinate and marginalised masculinities that structure the maritime profession *(Connell, 2005)*. Particularly productive for this study is the concept of industrial masculinity – a mode of thinking that supplies the economic rationale for the exclusion of women from maritime education: shipowners have historically regarded the provision of separate sanitary and living facilities for women as an unjustified additional expense rather than as an investment in expanding the pool of available talent *(Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025)*.

The empirical findings of this study directly illustrate the mechanism by which gender barriers are reproduced in maritime education. First, the language of the STCW Convention itself remains gender-marked: terms such as "manning", "seamanship" and "seamanlike" are used throughout the text of the Convention in a masculine grammatical and conceptual register, implicitly constructing the seafarer as male *(Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025)*. Second, the study documents an entrenched practice of "defeminisation": in order to feel part of the team, women seafarers consciously conceal markers of femininity – choosing short hairstyles and baggy work clothing, and smiling less *(Kitada, 2010; Kitada, 2013, cited in Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025)*. Third, and most telling for the subject of this chapter, one of the male engineering lecturers interviewed

directly justified the preference for men on the grounds of the physical strength required to operate a large spanner in the engine room *(Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025)* – that is, he applied the logic of "the body as an instrument of labour" *(Sassatelli, 2012, cited in Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025)* to justify gender segregation within a purportedly purely technical, gender-neutral competency.

It is at precisely this point that the analysis of Kitada and colleagues' extensive study intersects most productively with the conclusions of Sections 1 and 2 of this chapter. If the argument from physical strength has historically served as the material foundation of industrial masculinity in the engine room, then the spread of remote operation via ROCs, discussed in Section 1, and the transformation of the content of non-technical competencies towards communicative literacy, calibrated trust in automated systems and reflective emotional intelligence, discussed in Section 2, in principle undermine the material basis of that argument: an operator at a shore-based remote operations centre has no dealings with a physical spanner. In theory, this creates a window of opportunity – a shift in the competency paradigm from physical strength to cognitive and communicative skills could weaken one of the most entrenched, if least relevant, arguments historically advanced for the exclusion of women from the profession.

This thesis is borne out not only theoretically but by existing empirical observations. It is notable that, at the new remote-controlled quay-crane operations centre at Colombo West International Terminal, 25% of personnel are women *(j-l-a.com, 2026)* – a share disproportionately higher than the average proportion of women among seafarers (1%). Under the SMART-C project, supported by the IMO and the Republic of Korea, women professionals from developing countries are being deliberately trained in digital technologies for shore-based maritime roles, and as of early 2026 one training cohort comprised 40 participants *(j-l-a.com, 2026)*. An industry representative, interviewed by Nautilus International, put forward the hypothesis that women, who have traditionally been more likely to work in shore-

based roles connected with IT, data analytics and software, hold a head start in developing precisely those skills – cybersecurity, working with big data – that will prove decisive for the industry in the years ahead *(Nautilus International, 2026)*.

At the same time, the empirical evidence counsels against an overly optimistic reading of this trend. First, the distribution across shore-based technical roles remains highly uneven: according to UNCTAD port statistics, women account for 39% of port administration personnel but only 2% in direct cargo-handling roles *(j-l-a.com, 2026)* – that is, digitalisation does not in itself eliminate horizontal gender segregation by role type, but reproduces it within a new organisational configuration. Second, and most troubling for the thesis of technologically driven gender equality, a survey of more than 2,000 shore-based maritime roles in the United Kingdom recorded an average gender pay gap of 37.91% – almost three times the average pay gap across the economy as a whole (13.4%) *(j-l-a.com, 2026)*. Third, a study of the intersectional challenges of remote vessel operation in the United Kingdom finds that shipping companies remain inclined to regard the recruitment of women for technical roles as a "short-term" option, on the biased assumption that they are likely to leave upon having children *(Intersectional Analysis of Equitable Remote Operation, 2023)*. This confirms the central conclusion of this section by a different empirical route: relocating the workplace from ship to shore, and from physical to digital labour, does not in itself guarantee gender equality, since the organisational and cultural mechanisms of exclusion are reproduced more rapidly than the industry's technological infrastructure changes.

Nevertheless, the empirical findings of Kitada and colleagues' own study give grounds for caution regarding such an optimistic prognosis. The study documents a persistent gender disproportion specifically within the technical disciplines most closely bound up with digitalisation: the share of female students in "marine engineering" stands at only 6.25%, against 13.50% in "nautical science and maritime transport management" *(Barahona-Fuentes et al., 2020, cited in Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025).* It is telling that on one engineering course, the

proportion of female students, which had previously fluctuated between 8% and 22%, fell to zero in 2024 *(Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025)*. This means that the technical and technologically intensive strands of maritime education – precisely those most directly preparing professionals for work within the MASS and AI paradigm examined in Sections 1–2 – display a gender gap that is no smaller, and at times greater, than that of maritime education as a whole. This is consistent with the broader pattern of the gender gap in STEM disciplines *(Wang, Degol, 2017, cited in Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025)* and grounds the central thesis of this section: the technological transformation of competencies does not in itself remove structural barriers, but merely relocates the point at which they operate – from physical strength to technological literacy, the acquisition of which continues to take place under conditions of gender inequality.

No less telling is the gap the study identifies between lecturers' awareness and their possession of tools for gender-sensitive teaching. Several of the lecturers interviewed expressed willingness to integrate a gender perspective into the teaching of technical disciplines, yet frankly acknowledged a lack of methodological preparation: one senior lecturer directly asked the researchers whether someone might explain to him how this could be done, since his subjects – navigation and bridge procedures – seemed to him remote from gender issues *(Kitada, Barahona-Fuentes, Castells-Sanabra, 2025)*. This observation has direct practical significance for the line of enquiry pursued in this chapter: if non-technical competencies are being expanded with new, AI-related components (Section 2), then the preparation of maritime education staff for the gender-aware teaching of these new components must not lag behind the technological modernisation of curricula.

The topicality and timeliness of this issue is further confirmed by developments in 2026. The theme of the International Day for Women in Maritime, 18 May 2026 – "From Policy to Practice: Advancing Gender Equality for Maritime Excellence" – was aligned with the World Maritime Day theme, "From Policy to Practice: Strengthening Maritime Excellence", and the IMO Secretary-General, Mr

A. Dominguez, posed the question directly: “where exactly are we falling short, and what practical steps can we take to move beyond rhetoric and achieve real, lasting change” *(IMO, 2026d)*. Symbolically, it was at this very ceremony that the leading researcher M. Kitada, author of the study of masculinities in maritime education analysed above, was awarded the 2026 IMO Gender Equality Award, and her “Handbook on Gender Mainstreaming in the Maritime Sector” became the first publication of its kind in the industry *(IMO, WMU, 2026)*.

Methodologically, the concept of gender mainstreaming underlying the Handbook is neither novel nor a term devised specifically for the maritime sector, but rests upon the classic definition agreed by the United Nations Economic and Social Council (ECOSOC) in 1997 in fulfilment of the 1995 Beijing Platform for Action: gender mainstreaming is defined as the process of assessing the implications for women and men of any planned action – legislative, policy-related or programmatic – at all levels, rendering the concerns and experiences of both sexes an integral dimension of the design, implementation, monitoring and evaluation of policies and programmes *(ECOSOC, 1997)*. Applying this established international methodology to the maritime sector, where women traditionally constitute 1% of seafarers and only 19% of the senior staff of maritime administrations *(IMO, WMU, 2026)*, entails a systematic re-examination not merely of personnel policy but of the very content of educational components – including those that shape the non-technical competencies examined in this study – through the lens of gender implications, rather than as an isolated, supplementary measure.

In practical terms, the Handbook offers maritime education institutions a concrete methodological toolkit: methods of gender analysis of curricula and the working environment, the development of gender-equality action plans with measurable targets, and procedures for monitoring and evaluating outcomes *(IMO, WMU, 2026)*. It is telling that, in presenting the Handbook, Professor Kitada emphasised that gender mainstreaming requires leadership to implement, and that any individual, regardless of position or level, can practise gender mainstreaming on a

large or small scale *(IMO, WMU, 2026)* – a formulation that places responsibility for applying this methodology not only on institutional leadership but on every lecturer teaching the non-technical-competency disciplines examined in this study.

In summary, in answer to this section's research question – whether the technologically driven transformation of non-technical competencies opens a window of opportunity for gender equality at sea, or reproduces masculine norms of maritime education in a new form – a non-linear answer is warranted. The technological shift from physical strength to communicative, digital and reflective competencies does indeed remove one of the most materially entrenched arguments of industrial masculinity. Yet this shift is a necessary but not a sufficient condition for gender change: without deliberate institutional intervention – gender mainstreaming of curricula, the preparation of teaching staff, and the removal of gender-marked terminology from regulatory instruments – new technological competencies risk being acquired within the very same gender-unequal environment as traditional ones, as evidenced by the disproportionately low share of women specifically within the most technologically intensive strands of maritime education. The window of opportunity opened by digital transformation therefore requires deliberate, rather than spontaneous, exploitation.

In practical terms, this means that the elective course "Professional Integrity and Gender Equality in the Maritime Industry" should be aligned with the recently published IMO Handbook on Gender Mainstreaming and supplemented not merely with general theoretical material on gender equality but with applied case studies directly relevant to the industry's technological transformation – in particular, the experience of the remote crane-operations centre at Colombo and the SMART-C project. This transforms the course from a purely educational exercise into one that directly prepares graduates for practical work within the gender-balanced technological teams of the future – a thesis that, together with the recommendations of Section 2, is summarised in Table 2 in the conclusions of this study.

Conclusion. This study has traced the transformation of the maritime professional's non-technical (soft) competencies amid the digitalisation of shipping across three interrelated levels – regulatory, technological and gender-related – and has arrived at substantiated conclusions with respect to each.

First, it has been established that the recognition of non-technical competencies as a mandatory component of seafarer qualification has undergone a sustained evolution, from the framework-level introduction of BRM/ERM, leadership and teamwork by the 2010 Manila Amendments, through the comprehensive review of the STCW Convention launched in 2024 and subsequently accelerated (with a target completion date of 2029–2030), to the emergence of a separate regulatory track for autonomous shipping – the MASS Code, adopted only in May 2026, with its dedicated Chapter 15, "Human Element". It is telling that the IMO itself explicitly grounds the comprehensive review of the Convention in the combination of technological and gender-related factors within a single reform rationale, empirically confirming this study's central thesis regarding the interconnectedness of these, at first glance, disparate processes.

Second, three specific dimensions have been identified in which non-technical competencies are being filled with new content in connection with artificial intelligence: communication automation through generative AI (exemplified by SeaGPT); calibrated trust in autonomous systems, required to meet the MASS Code's demand that the human master retain the capacity for timely intervention in remote operation; and the transformation of the role of emotional intelligence under conditions of human interaction with intelligent systems that merely simulate, rather than experience, emotional states. These dimensions outline the practical pedagogical content of Chapter 15 of the MASS Code, which at the time of the Code's adoption remains largely a framework provision.

Third, the gender analysis has demonstrated that the technological shift from physical strength to cognitive and communicative competencies theoretically undermines one of the most entrenched arguments of industrial masculinity,

historically used to justify the exclusion of women from the maritime profession. However, the empirical evidence – in particular, the disproportionately low, and in places declining, share of women specifically within the most technologically intensive strands of maritime education – shows that technology does not automatically remove structural barriers but merely relocates the point at which they operate. Realising the potential inherent in the technology requires deliberate institutional intervention.

On the basis of the analysis conducted, practical recommendations may be formulated for maritime higher education institutions. Above all, the updating of non-technical-competency curricula in line with the requirements of the MASS Code should not proceed in isolation, but in tandem with the preparation of teaching staff for the gender-aware delivery of these new, technologically intensive components – it is precisely this combination that, according to the research analysed, maritime lecturers most conspicuously lack.

The analysis undertaken provides grounds for specifying these recommendations in relation to the existing structure of soft skills educational components at maritime education institutions – the mandatory course “Soft Skills for Seafarers” and the elective courses “Effective Communication in Professional Activity”, “Leadership and Team Interaction Management (Teambuilding)”, and “Professional Integrity and Gender Equality in the Maritime Industry”. A detailed rationale for specific innovations in respect of each of these components is provided within the relevant sections of this study (Sections 2 and 3); a consolidated summary of these recommendations is presented in Table 2.

Table 2.

Consolidated recommendations for updating soft skills educational components

Educational component	Current focus	Proposed innovation	Basis
"Soft Skills for Seafarers" (mandatory)	General non-technical competencies	Module on critical (non-instrumental) mastery of AI; exercises featuring deliberate automation errors	Sec. 2
"Effective Communication in Professional Activity"	Human–human communication	Module on hybrid human–AI communication; communication under stress and limited connectivity	Sec. 2, Intro.
"Leadership and Team Interaction Management (Teambuilding)"	Leadership within an on-board ship's team	Leadership in distributed ship–ROC human–machine teams; psychological safety	Sec. 1, 2
"Professional Integrity and Gender Equality in the Maritime Industry"	General theoretical material	Applied case studies (Colombo, SMART-C); gender-analysis toolkit per the IMO-WMU Handbook methodology	Sec. 3

To illustrate how the proposed innovations might be formalised in terms of programme learning outcomes, an example is offered here for the mandatory course "Soft Skills for Seafarers", incorporating the module on critical AI literacy (Table 2). On completion of the relevant module, the learner should be able to demonstrate the following learning outcomes: LO1 – explain Parasuraman and Riley's four-part typology of automated-system use (use, misuse, disuse, abuse) and apply it to analyse a specific instance of interaction with an autonomous system; LO2 – detect a deliberately embedded error in an automated recommendation system within a simulator scenario and make a reasoned decision to disregard it; LO3 – formulate a query to a generative AI tool for maritime communication (such as SeaGPT) and critically evaluate the correctness of the generated response prior to use; LO4 – identify the boundary between the appropriate use of adaptive, emotionally responsive AI functions and their potentially manipulative influence on a user's emotional state. This format ensures that the recommendations conform to higher-education standards requiring educational components to be described in terms of measurable learning outcomes rather than thematic content alone.

The scientific novelty of the study lies in its integrated treatment of the transformation of seafarers' non-technical competencies at the intersection of three strands that, in the existing literature, are for the most part addressed separately. Thus, the systematic review of MASS competencies *(Skills and Competencies for MASS, 2025)* analyses the technological dimension of the transformation of soft skills in detail, yet does not engage with gender equality; the study by Kitada and colleagues *(2025)* provides a thorough account of masculine norms in maritime education, but considers them independently of the technological transformation of competencies driven by the MASS Code; while the stakeholder study of the review of the STCW Convention *(Stakeholder Perspectives on the Comprehensive Review, 2025)* focuses on HTW delegations' positions regarding educational technology, without engaging with either the gender dimension or the substantive competency content of the reform. In contrast to these works, the present study demonstrates that the technological, regulatory and gender dimensions constitute a single, interconnected structural transformation of the human element in shipping, rather than three parallel agendas – a thesis empirically confirmed by the IMO itself through its bringing together of these issues within the HTW 12 agenda (Section 1).

The study is subject to certain limitations, which outline directions for further work. First, the analysis has been conducted predominantly on the basis of IMO regulatory instruments, academic literature and industry statistics, without original empirical research (surveys or interviews) among cadets or lecturers at a specific maritime education institution, which limits the scope for direct conclusions regarding the effectiveness of the pedagogical innovations proposed. Second, since the MASS Code was adopted only in May 2026 and remains at the experience-accumulation stage, and the comprehensive review of the STCW Convention has yet to be completed, certain conclusions are in the nature of a reasoned forecast rather than an analysis of already-established practice, and will require verification once both regulatory processes have concluded (an estimated 2029–2032). Third, the gender analysis has drawn predominantly on global data and case studies outside the

Ukrainian context (Colombo, the United Kingdom); direct empirical data on the gender balance among Ukrainian cadets in maritime specialisations under wartime conditions has not been employed in this study, owing to the absence of reliable, verified sources at the time of its preparation – a matter that outlines a promising avenue for future independent research.

Prospects for further research relate to the empirical testing of the proposed research framework using material from specific training programmes for Remote Operations Centre (ROC) operators, and to an analysis of how Chapter 15 of the MASS Code will be filled with concrete regulatory content during the Experience-Building Phase scheduled for 2026–2030.

References:

Bairamova, O. V. Formuvannia netekhnichnykh kompetentsii u morskii osviti vidpovidno do vymoh Konventsii PDNV [Development of non-technical competencies in maritime education in accordance with the requirements of the STCW Convention]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu [Bulletin of Kherson National Technical University]*. 2026. No. 2(97). Pp. 477–484.DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.2.58.

Varypaiev, O. M., Bairamova, O. V., Silvestrova, O. Yu. Emotsiinyi intelekt ta shtuchnyi intelekt: filosofska refleksiia subiektnosti v protsesakh piznannia [Emotional intelligence and artificial intelligence: a philosophical reflection on subjectivity in cognitive processes]. *Filosofiia ta upravlinnia [Philosophy and Governance]*. 2025. No. 2(6). Pp. 1–10. DOI: DOI: https://doi.org/10.70651/3041-248X/2025.2.02.

2025 MT Orinda fire. *Wikipedia*, 2025. URL: https://surl.lt/owrkpj (accessed: 27.08.2026).

AI and Digital Twins in Maritime Simulation: The Next Era of Smart Vessel Training. *EC Info Solutions*, 2026. URL: https://surl.li/begehe (accessed: 27.08.2026).

AI Meets Maritime Training: Precision Analytics for Enhanced Safety and Performance. *arXiv*, 2025. https://arxiv.org/abs/2507.01274.

Bairamova, O. Maritime Safety Psychology: Political and Ethical Dimensions of Safety Culture in Maritime Organisations. *Psychology Travelogs*. 2025. Issue 3. Pp. 108–130. DOI: https://doi.org/10.31891/PT-2025-3-11.

Bairamova, O. V. The Dialect of Hard and Soft Skills: A Philosophical Reflection on 21st Century Educational Paradigms. *Naukove piznannia: metodolohiia ta tekhnolohiia [Scientific Knowledge: Methodology and Technology]*. 2025. No. 1(55). Pp. 60–67. DOI: https://doi.org/10.24195/sk1561-1264/2025-1-8.

Barahona-Fuentes, C., Castells-Sanabra, M., Ordás, S., Torralbo, J. Female figures in maritime education and training institutions between 2009 and 2018: analysing possible impacts of gender policies. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2020. Vol. 19, No. 1. Pp. 143–158. DOI: https://doi.org/10.1007/S13437-019-00190-Y.

Bridge Resource Management – Ship Simulator and Bridge Teamwork IMO 1.22. *Maersk Training*, 2026. URL: https://surl.li/xtpaly (accessed: 27.08.2026).

Charting the Future of Maritime Education and Training: A Technology-Acceptance-Model-Based Pilot Study on Students' Behavioural Intention to Use a Fully Immersive VR Engine Room

Simulator. *Education Sciences*. 2025. Vol. 8, No. 3, article 84. DOI: https://doi.org/10.3390/asi8030084.
Connell, R. W. *Masculinities*. 2nd ed. Berkeley: University of California Press, 2005. 324 p. ISBN 978-0-520-24698-0.
Cultivating Cybersecurity Awareness Among Seafarers. *Procedia Computer Science*, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.07.030.
Cybersecurity on Passenger Ships: Training a Crew That's Never at a Desk. *FMTC Safety*, 2026. URL: https://surl.li/ihxdum (accessed: 27.08.2026).
DNV. Cyber Security in the Maritime Industry – General Awareness Training. *DNV*, 2026b. URL: https://surl.li/dkqtqd (accessed: 27.08.2026).
DNV. IMO MSC 111: New MASS Code adopted. *DNV*, 2026a. URL: https://surl.li/falcrw (accessed: 27.08.2026).
DNV. IMO Sub-Committee on Human Element, Training and Watchkeeping (HTW 12). *DNV*, 2026c. URL: https://surli.cc/nftwgo (accessed: 27.08.2026).
ECOSOC. Mainstreaming the gender perspective into all policies and programmes in the United Nations system. Agreed conclusions 1997/2. *United Nations Economic and Social Council*, 1997. URL: https://surl.li/uqncjo (accessed: 27.08.2026).
Edmondson, A. C. Psychological Safety and Learning Behavior in Work Teams. *Administrative Science Quarterly*. 1999. Vol. 44, No. 2. Pp. 350–383. DOI: https://doi.org/10.2307/2666999.
Endsley, M. R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*. 1995. Vol. 37, No. 1. Pp. 32–64. DOI: https://doi.org/10.1518/001872095779049543.
Europe. *Maritime Risk International*, 2026. URL: https://surl.li/zwdzuu (accessed: 27.08.2026).
Explainable AI for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS): Adaptive Interfaces and Trustworthy Human-AI Collaboration. *arXiv*, 2025. https://arxiv.org/pdf/2509.15959.
Flin, R., O'Connor, P., Crichton, M. *Safety at the Sharp End: A Guide to Non-Technical Skills*. Aldershot: Ashgate, 2008. 317 p. ISBN 978-0-7546-4600-6.
For Women in Maritime Every Day. *J-L-A*, 2026. URL: https://surl.li/steklv (accessed: 27.08.2026).
The Gender Benefits of Digitalisation in Shipping. *Nautilus International*, 2026. URL: https://surl.li/qypetb (accessed: 27.08.2026).
Greywing's new SeaGPT solves email overwhelm for maritime crew members. *TechCrunch*, 24 April 2023. URL: https://techcrunch.com/2023/04/24/greywing-seagpt/ (accessed: 27.08.2026).
IMO's HTW 12 Opens Major STCW Convention Review in 2026. *SeaEmploy*, 2026. URL: https://seaemploy.com/imos-htw-12-stcw-review-2026/ (accessed: 27.08.2026).
IMO, WISTA. IMO-WISTA Women in Maritime Survey 2024. *International Maritime Organization*, 2025. URL: https://surli.cc/mxwmso (accessed: 27.08.2026).
IMO, WMU. IMO and WMU launch handbook on gender mainstreaming in the maritime sector. *International Maritime Organization, World Maritime University*, 2026. URL: https://surli.cc/vkcqry (accessed: 27.08.2026).
IMO. Comprehensive review of the STCW Convention and Code – FAQ. *International Maritime Organization*, 2026a. URL: https://surl.li/caanbc (accessed: 27.08.2026).
IMO. International Day for Women in Maritime 2026: Mainstreaming gender equality in shipping. *International Maritime Organization*, 2026d. URL: https://surl.li/yxvtxn (accessed: 27.08.2026).
IMO. Maritime Safety Committee – 110th session (MSC 110), 18–27 June 2025. *International Maritime Organization*, 2025. URL: https://surl.li/yxvtxn (accessed: 27.08.2026).
IMO. Model Course 1.22: Ship Simulator and Bridge Teamwork. *International Maritime Organization*, 2002. URL: https://catalog.wmu.se/bib/20968 (accessed: 27.08.2026).
IMO. MSC 111th session – highlights. *International Maritime Organization*, 2026b. URL: https://surl.li/luzegr (accessed: 27.08.2026).

IMO. Preview: Maritime Safety Committee – 111th session (MSC 111), 13–22 May 2026. *International Maritime Organization*, 2026c. URL: https://surli.cc/aybqhd (accessed: 27.08.2026).

Intersectional Analysis of the Challenges and Opportunities of Equitable Remote Operation in the UK Maritime Sector. In: *First International Symposium on Trustworthy Autonomous Systems (TAS'23)*, Edinburgh, 2023. 8 p. DOI: https://doi.org/10.1145/3597512.3600202.

Kitada, M., Barahona-Fuentes, C., Castells-Sanabra, M. Masculinities in maritime education and training: an opportunity to advance towards gender equality. *Maritime Studies*. 2025. Vol. 24, article 38. DOI: https://doi.org/10.1007/s40152-025-00432-1.

Parasuraman, R., Riley, V. Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors*. 1997. Vol. 39, No. 2. Pp. 230–253. DOI: https://doi.org/10.1518/001872097778543886.

Polish Register of Shipping (PRS). Sub-Committee on Human Element, Training and Watchkeeping (HTW 12). *PRS*, 2026. URL: https://prs.pl/en/2026/03/06/imo-htw12/ (accessed: 27.08.2026).

Reason, J. *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 302 p. ISBN 978-0-521-31419-0.

Russia – Ukraine War: Impact on shipping. *NorthStandard*, 2025. URL: https://surl.li/tkyonk (accessed: 27.08.2026).

Russian and Ukrainian seafarers make up 14.5% of global shipping workforce, according to ICS. *International Chamber of Shipping*, 2021. URL: https://surl.li/lwltwq (accessed: 27.08.2026).

Salovey, P., Mayer, J. D. Emotional Intelligence. *Imagination, Cognition, and Personality*. 1990. No. 9. Pp. 185–211. DOI: https://doi.org/10.2190/DUGG-P24E-52WK-6CDG.

Skills and competencies for operating maritime autonomous surface ships (MASS): a systematic review and bibliometric analysis. *Maritime Policy & Management*. 2025. Pp. 1–26. DOI: https://doi.org/10.1080/03088839.2025.2475177.

Stakeholder perspectives on the comprehensive review of the IMO STCW convention and code. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/18366503.2025.2589597.

Toward personalised maritime training: seafarer perceptions of AI-based and traditional feedback. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2026. DOI: https://doi.org/10.1080/20464177.2026.2675418.

Wang, M.-T., Degol, J. L. Gender gap in science, technology, engineering, and mathematics (STEM): current knowledge, implications for practice, policy, and future directions. *Educational Psychology Review*. 2017. Vol. 29, No. 1. Pp. 119–140. DOI: https://doi.org/10.1007/s10648-015-9355-x.

Wärtsilä launches next-generation simulation platform to support future-ready maritime training. *Wärtsilä*, 2026. URL: https://surl.li/vtcwtw (accessed: 27.08.2026).

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-85
UDC 355.23:623.746-519:378.147

CHAPTER 3.
TRANSFORMATION OF MILITARY EDUCATION IN ACCORDANCE WITH THE SAT METHODOLOGY: THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES AND GROUND ROBOTIC SYSTEMS IN THE TRAINING OF FUTURE OFFICERS OF THE SECURITY AND DEFENCE FORCES

Oleh BATIUK
Doctor of Laws, Professor
National Academy of the National Guard of Ukraine
(61000, Defenders of Ukraine Square, 3, Kharkiv, Ukraine)
ovb1406@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-2291-4247

Andrii MANKO
PhD, commander of the National Academy
of the National Guard of Ukraine, colonel,
(61000, Defenders of Ukraine Square, 3, Kharkiv, Ukraine)
https://orcid.org/0009-0002-9860-9561

Volodymyr TROBIUK
Candidate of Military Sciences, Professor,
Head of the Educational and Scientific Center
for the Organization of the Educational Process,
National Academy of the National Guard of Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-3248-2935

Abstract. The article substantiates the need to transform contemporary military education in accordance with the NATO Systems Approach to Training (SAT) methodology, taking into account the dynamic development of unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground robotic systems (GRSs), as well as their growing importance in the performance of tasks by the security and defence forces. It is established that the traditional model of future officers' training needs to transition towards a systematic, competency-based, and outcome-oriented model focused on developing the professional capabilities required for the effective application of modern technologies in operational and combat activities. The methodological potential of NATO SAT is examined as a cyclical approach that ensures the interconnection between the identification of training needs, the design of learning outcomes, the development of training resources, the implementation of the educational process, and the evaluation of its effectiveness.

The authors propose a model training programme for future officers of the

security and defence forces incorporating UAVs and GRSs, structured in accordance with the five stages of NATO SAT: Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation. The content of each stage is defined, and the need to integrate them into a single cyclical process of continuous improvement is substantiated. Particular attention is paid to developing the technological, tactical, managerial, information-analytical, and communication competencies of future officers, enabling them to plan and organise the employment of robotic systems, analyse the information obtained, make informed decisions, and integrate technological capabilities into unit operations. The feasibility of using simulators, training devices, digital platforms, practical and field training, scenario-based learning, and combat experience as components of the proposed model is substantiated.

It is established that the key advantage of applying NATO SAT lies in ensuring a systematic link between the actual needs of the security and defence forces, the content of military education, and the expected professional capabilities of graduates. It is demonstrated that the Evaluation stage should serve not only as a means of monitoring learning outcomes but also as a mechanism for providing feedback to reassess training needs and adjust the educational programme. The proposed approach creates the conditions for developing an adaptive model of military education capable of responding promptly to changes in the nature of operational and combat tasks, advances in unmanned and robotic technologies, and the accumulation of combat experience. It is concluded that integrating the NATO SAT methodology with the systematic use of UAVs and GRSs represents a promising direction for transforming the training of future officers of the security and defence forces and enhancing their readiness to perform tasks in the contemporary security environment.

Keywords: security, military, education, transformation, NATO, Systems Approach to Training (SAT), approach, system, training, unmanned aerial vehicles (UAVs), ground robotic systems (GRSs), officer training, defence, competencies, capabilities, technologies.

ТРАНСФОРМАЦІЯ ВІЙСЬКОВОЇ ОСВІТИ ВІДПОВІДНО ДО МЕТОДОЛОГІЇ SAT: ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ І НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ У ПІДГОТОВЦІ МАЙБУТНІХ ОФІЦЕРІВ СИЛ БЕЗПЕКИ ТА ОБОРОНИ

Анотація. У статті автори обґрунтовують необхідність трансформації сучасної військової освіти відповідно до методології NATO Systems Approach to Training (SAT) з урахуванням динамічного розвитку безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та наземних роботизованих комплексів (НРК) і їх зростаючого значення у виконанні завдань силами безпеки та оборони. Визначено, що традиційна модель підготовки майбутніх офіцерів потребує переходу до системної, компетентнісної та результативної моделі, орієнтованої на формування професійних спроможностей, необхідних для ефективного застосування сучасних технологій у службово-бойовій діяльності. Розкрито

методологічний потенціал NATO SAT як циклічного підходу, що забезпечує взаємозв'язок між визначенням потреб у підготовці, проєктуванням освітніх результатів, розробленням навчального забезпечення, реалізацією освітнього процесу та оцінюванням його ефективності.

Автори пропонують модель програми підготовки майбутніх офіцерів сил безпеки та оборони із використанням БпЛА та НРК, побудовану відповідно до п'яти етапів NATO SAT: Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation. Визначено зміст кожного етапу та обґрунтовано необхідність їх інтеграції у єдиний циклічний процес безперервного вдосконалення. Особливу увагу приділено формуванню технологічних, тактичних, управлінських, інформаційно-аналітичних і комунікаційних компетентностей майбутнього офіцера, здатного планувати та організовувати застосування роботизованих систем, аналізувати отриману інформацію, приймати обґрунтовані рішення та інтегрувати технологічні спроможності у діяльність підрозділу. Обґрунтовано доцільність використання симуляторів, тренажерів, цифрових платформ, практичних і польових занять, ситуаційного навчання та бойового досвіду як складових реалізації запропонованої моделі.

Встановлено, що ключовою перевагою застосування NATO SAT є забезпечення системного зв'язку між реальними потребами сил безпеки та оборони, змістом військової освіти та очікуваними професійними спроможностями випускників. Доведено, що етап Evaluation має виконувати не лише функцію контролю результатів навчання, а й забезпечувати зворотний зв'язок для повторного аналізу потреб і коригування освітньої програми. Запропонований підхід створює передумови для формування адаптивної моделі військової освіти, здатної оперативно реагувати на зміни характеру службово-бойових завдань, розвиток безпілотних і роботизованих технологій та накопичення бойового досвіду. Зроблено висновок, що інтеграція методології NATO SAT із системним використанням БпЛА та НРК є перспективним напрямом трансформації підготовки майбутніх офіцерів сил безпеки та оборони та підвищення їх готовності до виконання завдань у сучасному безпековому середовищі.

Ключові слова: безпека, військо, освіта, трансформація, NATO, Systems Approach to Training (SAT); підхід, система, навчання, безпілотні літальні апарати, наземні роботизовані комплекси, підготовка, офіцерів, оборона, компетентності, спроможності, технології.

Research Relevance. The ongoing transformation of the security and defence sector is accompanied by the rapid development of unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground robotic systems (GRSs), which are gradually becoming integral components of military personnel's professional activities. Their use expands capabilities in reconnaissance, surveillance, situational monitoring, logistical support,

engineering support, and the performance of other tasks, while simultaneously reducing risks to personnel. The rapid evolution of unmanned and robotic technologies necessitates a review of traditional approaches to military education and the alignment of the content of future officers' professional training with contemporary technological and operational requirements.

The need to equip future officers of the security and defence forces with not only practical skills in operating individual unmanned systems but also a comprehensive understanding of their operating principles, capabilities, limitations, and role within the system of contemporary security capabilities is becoming particularly relevant. The rapid emergence of new types of UAVs, robotic platforms, autonomous and semi-autonomous systems, various control channels, sensor systems, and digital information-processing tools creates a need to develop an adaptive model of professional training. Such a model should ensure that future officers are capable of rapidly mastering new technologies, assessing their functional capabilities, and integrating them into the performance of professional tasks.

It should be noted that the transformation of military education does not entail merely incorporating UAVs and GRSs into individual academic disciplines; rather, it requires a comprehensive modernisation of the content, formats, methods, and technologies of instruction. Promising approaches include practice-oriented, competency-based, problem-based, and scenario-based learning, as well as simulation technologies, digital training simulators, and the modelling of professional situations. The interdisciplinary integration of technical, tactical, informational, managerial, and analytical training is of particular importance, as it enables future officers to develop a systemic understanding of the capabilities of unmanned and robotic technologies and their role in professional decision-making.

Therefore, we believe that the relevance of this study is determined by the need to transition from a traditional model of military training to a technologically adaptive system of professional military education capable of responding promptly to the pace of development of unmanned and robotic technologies. Examining the

pedagogical conditions, principles, and mechanisms for integrating UAVs and GRSs into the training of future officers of the security and defence forces is essential for improving the quality of military education, developing contemporary professional competencies, and ensuring that graduates are prepared to operate in a technologically advanced and dynamic security environment.

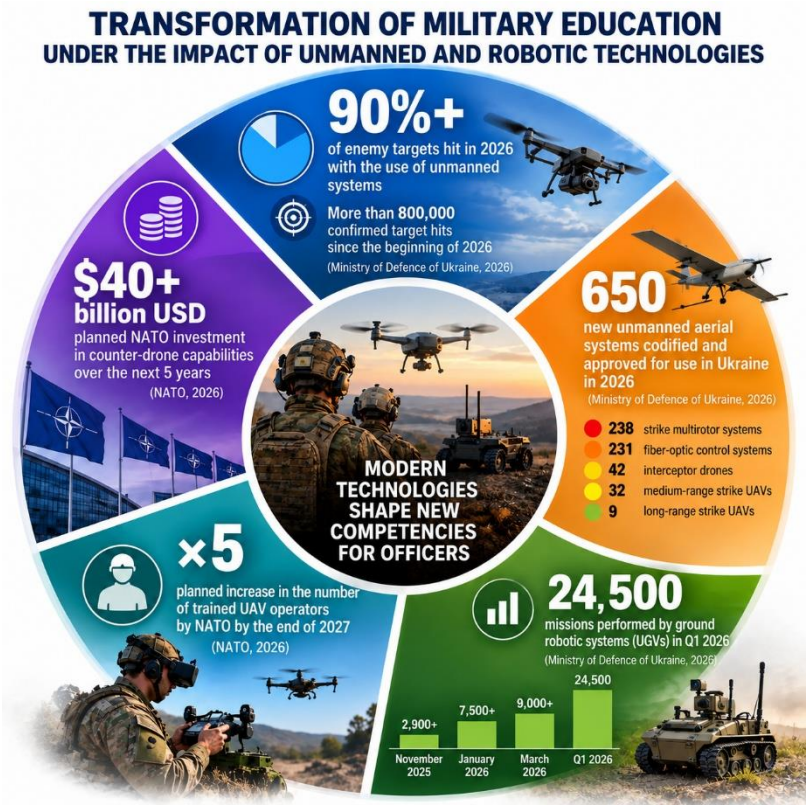

Figure 1. Transformation of military education under the impact of unmanned and robotic technologies

It should be noted that, overall, the authors have demonstrated in the figure the logical relationship between the rapid development of UAVs and GRSs → the expansion of their application → the emergence of new technological capabilities → changes in the requirements for military personnel → the need to transform military education → the development of new competencies among future officers.

The purpose of this article is to substantiate the need to transform military education by integrating unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground robotic systems (GRSs) into the professional training of future officers of the security and

defence forces. The study aims to analyse the impact of the rapid development and practical application of unmanned and robotic technologies on the content, formats, and methods of military training, as well as to identify the key competencies required by future officers to effectively operate and manage such systems in a dynamic security environment. Particular attention is paid to the development of adaptive, competency-based, and practice-oriented approaches to military education that can respond to the rapid technological evolution of modern warfare.

Research Gap. In our view, despite the considerable number of contemporary studies devoted to the development and combat employment of unmanned aerial vehicles, significantly less attention has been paid to the educational and pedagogical dimension of integrating unmanned and robotic technologies into the professional training system for future officers of the security and defence forces. Existing research predominantly focuses on the technical characteristics of UAVs, their tactical employment capabilities, autonomy, reconnaissance, navigation, countermeasures against electronic warfare systems, and other operational aspects. At the same time, insufficient attention has been paid to how the rapid changes in the range and functional capabilities of unmanned systems should transform the content of military education, training programmes, and the professional competencies of future officers.

We believe that gaps remain in contemporary research due to the fragmented nature of studies addressing the simultaneous integration of UAVs and ground robotic systems (GRSs) into the training of military specialists. A substantial proportion of publications examine aerial or ground robotic systems separately, whereas the contemporary security environment is characterised by their increasingly close interaction and employment as components of integrated technological capabilities. Pedagogical approaches to developing future officers' systemic understanding of the interaction between aerial and ground robotic platforms, digital control systems, information collection and analysis tools, and professional decision-support systems remain insufficiently defined.

In our view, contemporary research still lacks a sufficiently substantiated model for training future officers that takes the pace of technological change into account. A traditional training model focused on acquiring a stable set of technical knowledge and skills does not fully meet the requirements of a situation in which new types of UAVs, robotic platforms, control systems, and hardware and software solutions emerge faster than educational programmes can be updated. Consequently, insufficient research has been conducted into the development of adaptability, technological literacy, digital competence, systems thinking, the ability to rapidly master new platforms, and the capacity to make professional decisions based on data. These qualities should become integral components of contemporary officer training.

We also believe that the mechanism for continuously updating military education in line with the practical employment experience of unmanned and robotic systems remains insufficiently developed. There is a need to move away from a model in which the educational system merely adapts to technologies that have already been developed towards an adaptive model of military education capable of promptly incorporating new technological solutions, the results of their practical application, changes in professional tasks, and the emergence of new competencies. This research gap underscores the need to investigate the conceptual and pedagogical foundations of military education transformation and to develop approaches for integrating UAVs and GRSs into the professional training of future officers of the security and defence forces.

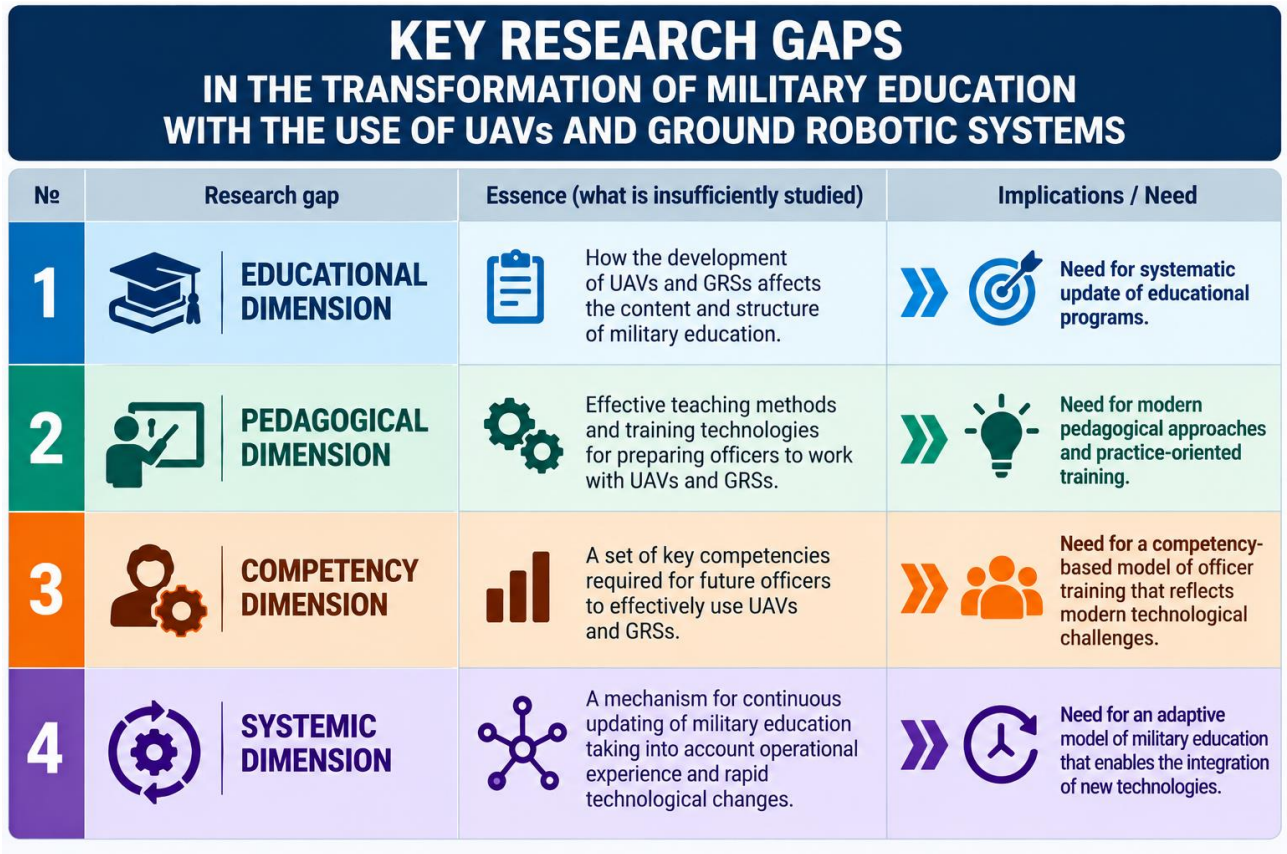

Figure 2. Key research gaps in the transformation of military education with the use of UAVs and ground robotic system

The scientific novelty of the study lies in substantiating a conceptual approach to the transformation of military education based on the systematic integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground robotic systems (GRSs) into the professional training of future officers of the security and defence forces. Unlike approaches that focus predominantly on the technical or operational capabilities of unmanned systems, this study considers their integration as a factor in the comprehensive transformation of the educational process, encompassing its content, teaching methods, the system of professional competencies, and mechanisms for ensuring the quality of education.

The study advances the understanding of the professional competencies required by future officers in a technologically advanced security environment. It proposes a competency framework that combines technological and digital literacy,

practical skills in operating UAVs and GRSs, systems thinking, data-driven decision-making, the ability to adapt to rapid technological change, and the capacity to integrate unmanned capabilities into the performance of professional tasks. This approach shifts the focus from training operators of specific platforms to preparing officers capable of effectively managing and integrating continuously evolving unmanned and robotic capabilities.

An important element of the scientific novelty is the substantiation of an adaptive model of military education that provides for the continuous updating of professional training content in accordance with technological developments, practical experience in the employment of unmanned and robotic systems, and emerging professional requirements. The model establishes a feedback loop connecting the practical employment of UAVs and GRSs, the analysis of operational experience, the identification of new competencies, the updating of educational programmes, and the implementation of modern practice-oriented training technologies. This creates a foundation for a more flexible and resilient military education system capable of responding to the rapid evolution of unmanned and robotic technologies.Analysis of recent research and publications.

In the scientific article by Kryvoruchko, V. *(2026),* entitled "Structure and Components of the Professional Readiness of Future Officers of the National Guard of Ukraine for the Use of Unmanned Aerial Vehicles: A Pedagogical Perspective," the pedagogical aspects of preparing future officers of the National Guard of Ukraine to employ unmanned aerial vehicles in operational and combat activities are examined. The concept of "professional readiness of future officers of the National Guard of Ukraine to employ unmanned aerial vehicles" is refined and defined as an integrative personal and activity-oriented construct characterised by an officer's conscious commitment to the lawful, safe, and effective use of unmanned aircraft systems in operational and combat activities. This readiness is manifested through the unity of legal knowledge, technical skills, analytical abilities, motivational and value orientations, and volitional qualities.

The proposed structure comprises four components: the cognitive component, which encompasses a system of legal knowledge, knowledge of the technical characteristics of unmanned aircraft systems, and flight safety requirements; the activity-based component, which includes practical abilities and skills related to pre-flight preparation, piloting, and the use of video recording equipment; the motivational component, which comprises value orientations and the officer's intrinsic commitment to the lawful and responsible use of unmanned aerial vehicles; and the personal and volitional component, which encompasses personality traits that ensure the successful application of knowledge and skills in actual operational and combat activities.

Three levels of professional readiness are identified: basic (fragmentary knowledge and limited skills exercised under instructor supervision), sufficient (systematic knowledge, established skills in typical conditions, and the ability to work independently), and advanced (in-depth knowledge and the ability to train subordinates), each with corresponding assessment criteria. The regulatory and legal framework governing the use of unmanned aerial vehicles is analysed with reference to Order No. 12 of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated 13 January 2021. Four interrelated organisational components of training are substantiated: the regulatory and legal component, the professionally oriented technical component, the practical component, and the information and analytical component. Each is designed to develop the corresponding structural component of professional readiness. A correlation is established between the structural components of professional readiness and the organisational areas of training, thereby ensuring a systematic approach to the pedagogical process.

International experience in training unmanned aerial vehicle operators within law enforcement and military organisations in NATO and European Union countries is summarised, with reference to FAA, LEDA, EASA, ATP-3.3.8.1, and STANAG 4670 standards. This experience supports the validity of the proposed structure of professional readiness and the appropriateness of a comprehensive approach to

training *(Kryvoruchko, V., 2026).*

An analysis of the structure of future officers of the National Guard of Ukraine's professional readiness to employ UAVs provides grounds for asserting that contemporary military education must develop not merely a set of technical operator skills, but a comprehensive professional capability enabling officers to operate in a technologically advanced security environment. The combination of cognitive, activity-based, motivational, and personal and volitional components demonstrates the appropriateness of a competency-based training model in which technological knowledge is integrated with practical skills, analytical thinking, responsibility, and the ability to make decisions under complex conditions.

At the same time, in our view, the contemporary model of professional readiness needs to be extended beyond the use of UAVs alone. The rapid development of ground robotic systems creates a need to equip future officers with additional competencies related to the management, coordination, and integration of different robotic platforms. Accordingly, a promising direction is to move from a model focused on preparing officers to use an individual technological system towards a model of comprehensive readiness to manage unmanned and robotic capabilities, encompassing aerial, ground-based, and digital components.

The relationship proposed in Kryvoruchko's study between the structural components of professional readiness and the organisational areas of training is of particular importance. This approach can be further developed towards an adaptive educational model in which the results of the practical employment of UAVs and ground robotic systems, technological innovations, and changes in professional tasks directly inform updates to training programmes, course content, practical scenarios, simulation technologies, and assessment criteria. Thus, military education should function not as a static system for transmitting knowledge, but as a dynamic system of continuous professional development and renewal.

In this regard, we consider an integrated competency-based model for future officers' training to be a promising approach. In addition to cognitive and practical

components, it should incorporate digital literacy, systems thinking, data analysis, technological adaptability, the management of unmanned and robotic systems, risk assessment, and decision-making. Such a model would enable a transition from training specialists capable of effectively operating a particular type of UAV to preparing officers who can integrate technological capabilities, understand the capabilities and limitations of different systems, and organise their coordinated employment.

In our view, the transformation of military education involves not merely incorporating UAVs and ground robotic systems into training programmes, but changing the very paradigm of future officers' professional training. This transformation should entail the systematic integration of technological, practical, analytical, managerial, and personal development, the continuous updating of educational content in line with technological advances, and the use of practical experience. This approach creates the conditions for developing officers who are capable not only of employing contemporary unmanned and robotic systems, but also of effectively integrating them into professional activities, unit management, and decision-making in a complex security environment.

In their 2025 scientific article entitled "Analysis of Current Training Programmes for Special Operations Forces Personnel in the Use of Unmanned Aerial Vehicles," Heorhiiev, V. and Tkhorzhevskyi, D. *(2025)* conduct a comprehensive analysis of contemporary professional training programmes designed to prepare future officers of the Special Operations Forces (SOF) of the Armed Forces of Ukraine for the use of unmanned aerial vehicles (UAVs). The authors examine current methodological approaches, organisational principles, and the specific features of training programmes implemented within the military education system to ensure the operational control and employment of UAVs in combat operations. They outline the role of instructors' combat experience in officer training, particularly with regard to tactical simulation and the adaptation of traditional teaching methods to the realities of combat operations.

The article assesses contemporary challenges, including technological support, the improvement of training programmes, and the preparation of personnel for the effective use of UAVs in complex operational environments. It identifies prospects for the further development of training programmes, including the integration of simulators, the introduction of practical exercises involving combat units, and the development of new training standards aimed at enhancing the combat effectiveness of future SOF officers. Potential avenues for improving training programmes are also considered, particularly through the adaptation of international experience, the expansion of interagency cooperation, and the integration of modern artificial intelligence technologies to optimise the use of UAVs in combat environments.

Particular attention is paid to preparing officers to operate in high-technology environments, which requires an in-depth understanding of digital control systems and the analysis of data obtained through unmanned platforms and systems. The authors emphasise the need to develop innovative training modules that will enable future SOF officers to respond effectively to dynamic changes in tactical situations and employ UAVs in conjunction with other types of military equipment. Specifically, the article examines the role of interactive training, training grounds featuring realistic combat simulations, and gamification techniques in improving learning outcomes. Overall, the article outlines a comprehensive approach to the professional training of future SOF officers, aimed at developing the contemporary competencies required to accomplish combat missions successfully under evolving conditions of military operations *(Heorhiiev, V., & Tkhorzhevskyi, D., 2025).*

An analysis of contemporary approaches to preparing future Special Operations Forces officers for the use of unmanned aerial vehicles indicates that UAVs can no longer be regarded merely as a separate subject of professional training or as a specialised technical tool. Their employment necessitates a comprehensive modernisation of military education, including its content, teaching methods, the organisation of practical training, and the system for developing future officers' professional competencies. Simulation technologies, realistic tactical modelling,

practical exercises, and the incorporation of combat experience are becoming particularly important, as they help align the educational process more closely with the actual conditions of professional practice.

At the same time, we argue that the further transformation of military education must extend beyond training personnel solely in the use of UAVs. The emergence and widespread adoption of ground robotic systems (GRSs) introduce a new technological dimension into officers' professional activities. Accordingly, a promising direction is the development of an integrated training system in which UAVs and GRSs are treated as interconnected elements of a unified unmanned and robotic operational environment. This approach involves preparing future officers not only to operate individual platforms but also to coordinate their interaction, manage robotic capabilities, analyse information, and use the resulting data to support professional decision-making.

An important outcome of this approach should be a transformation of the professional training model itself: from preparing an operator of a specific technological system to educating an officer capable of integrating diverse technological capabilities into the performance of professional tasks. This requires combining competency-based, practice-oriented, digital, and adaptive approaches, alongside the continuous updating of training programmes in response to emerging technologies, changes in the nature of combat missions, and the accumulation of practical experience.

We believe that the transformation of military education should be regarded as a continuous and adaptive process through which practical experience gained from the use of UAVs and GRSs is translated into new learning outcomes, training modules, methodologies, simulation scenarios, and professional competencies. The proposed approach provides the foundation for developing a new type of technologically proficient officer—an officer-integrator of unmanned, robotic, digital, and human capabilities—who is able to operate effectively in a dynamic and technology-intensive security environment.

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground robotic systems (GRSs) should transform not only the technical component of military training but also the very philosophy of professional education for future officers—from mastering individual platforms to developing the ability to integrate unmanned, robotic, and digital capabilities into a unified system of professional activity.

In their scientific article entitled "Trends in the Professional Training of Officer Personnel of Ukraine's Security and Defence Sector under Martial Law," Didenko, O., Snitsa, T., Demianiuk, Y., Androshchuk, O., and Korchev, V. *(2023)* identify the principal trends in the professional training of officer personnel at higher military educational institutions within Ukraine's security and defence sector under the legal regime of martial law. The authors establish that one of the most significant trends is the integration of modern technologies into military education. The nature of combat operations is changing under the influence of digital technologies; consequently, future officers must be prepared to operate unmanned aerial vehicles, automated troop command-and-control systems, and electronic warfare equipment. Particular attention should be devoted to mastering both reconnaissance and strike drones, as well as systems designed to counter them.

Another important trend involves adapting training to the evolving nature of combat operations, particularly the transition towards manoeuvre warfare and adaptive tactics. Future officers must study dynamic defence methods, the employment of small tactical units, and flexible counterattack techniques. Preparation for network-centric warfare is also of considerable importance, as it requires effective real-time coordination among different units through digital technologies.

The authors further establish that competency-based officer training aimed at countering adversary information and psychological operations is particularly relevant. Such operations are conducted to disseminate propaganda and disinformation and to undermine the morale of Ukrainian military personnel. Accordingly, future commanders must learn to recognise hostile information and psychological operations, counter disinformation, and use social media and other

media channels effectively to sustain the morale of their subordinates and the civilian population.

Other important aspects of officer training include developing risk-aware thinking, the ability to make decisions in crisis situations, leadership qualities, and psychological resilience. Given the substantial number of wounded personnel on the frontline, advanced training in tactical medicine is becoming increasingly important. Future commanders must acquire the fundamentals of battlefield first aid, learn to organise casualty evacuation, and develop the ability to use unmanned and robotic systems effectively for casualty transportation.

Strengthening international cooperation and adapting NATO standards constitute another important area of development. The Armed Forces of Ukraine and other military formations are gradually adopting Western approaches to military command and control, which necessitates corresponding changes in military education. This process involves active participation in international exercises, the introduction of new systems for inter-unit coordination, and the standardisation of military procedures *(Didenko, O., Snitsa, T., Demianiuk, Y., Androshchuk, O., & Korchev, V., 2025).*

An analysis of contemporary trends in the professional training of officer personnel within Ukraine's security and defence sector demonstrates the need for a systemic transformation of military education in response to technological changes in the nature of modern warfare. Whereas unmanned aerial vehicles and robotic systems were previously regarded primarily as separate technical assets supporting the accomplishment of combat missions, they are increasingly becoming integral components of reconnaissance, surveillance, command and control, logistics, evacuation, fire engagement, and operational information support. This development necessitates a shift from the fragmented introduction of future officers to these technologies towards their systematic integration into the content of professional military education.

A promising direction for this transformation is the development of a new

competency-based model of the future officer. This model should encompass not only knowledge of the technical characteristics and operating principles of UAVs and GRSs but also the ability to plan their employment, coordinate different robotic platforms, analyse the information obtained, assess risks, and make decisions under conditions of uncertainty. Accordingly, officer training should gradually shift from the model of an "operator of an individual technical asset" to that of a "technology-capability integration officer"—a professional capable of combining human, digital, unmanned, and robotic resources to accomplish professional tasks.

In our view, UAVs and GRSs should not be considered in isolation but rather as components of a unified, digitalised, and network-centric military operational environment. In this context, the integration of simulation-based training, digital simulators, scenario-based modelling, practical exercises involving robotic platforms, analysis of actual combat experience, and decision-support technologies into the educational process represents a promising approach. Such an approach would strengthen the relationship between theoretical instruction, practical skills, and the future officer's ability to operate under conditions of rapidly evolving technologies and changing tactical situations.

We believe that the transformation of military education should involve more than simply incorporating UAVs and GRSs into individual academic courses. It should entail the development of an adaptive educational system capable of continuously updating the content, methods, and technologies of professional training in line with advances in unmanned and robotic capabilities. In our opinion, the combination of competency-based, practice-oriented, digital, and adaptive approaches provides the necessary foundation for preparing future officers of the security and defence forces to integrate UAVs and GRSs effectively into their professional activities and make well-founded decisions in the contemporary security environment.

In their scientific article entitled "Exploration of UAV Course Teaching in Military Academy under Mixed Teaching Mode," Tao Tong and Qiwu Wu *(2023)*

state that the blended learning model represents an important direction for reforming the educational process in military educational institutions. Using the teaching of an unmanned aerial vehicle (UAV) course as an example, the article examines teaching methods that address the needs of training a new generation of highly qualified military professionals.

First, based on an analysis of the educational context, the authors investigate the specific characteristics and principal contradictions associated with contemporary UAV course instruction. Subsequently, taking into account the use of blended online and offline learning, they propose a tiered approach to course delivery and develop a differentiated content system. This system encompasses fundamental knowledge of UAVs, an analysis of their operating principles, and the classification and gradation of their practical applications. The course content is structured around several components, including learners, content, educational resources, learning activities, and assessment. This structure facilitates an effective combination of the instructor's role and learners' active participation in the educational process *(Tao Tong & Qiwu Wu, 2023).*

An analysis of the proposed approach to teaching UAV courses at military educational institutions suggests that integrating UAVs into military education requires more than simply incorporating a relevant academic discipline into an educational programme. It also necessitates a comprehensive transformation of professional training methodologies. The application of a blended learning model creates opportunities to combine theoretical instruction, digital educational resources, practical classes, active independent learning, and the systematic assessment of learning outcomes.

We believe that this approach demonstrates the value of differentiating learning content according to learners' levels of preparedness, the nature of professional tasks, and the complexity of the technologies involved. This is particularly important in the training of future officers of the security and defence forces. Such an organisation of the educational process makes it possible to move beyond the uniform acquisition of

technical knowledge towards the development of comprehensive professional competencies required for the effective use of unmanned systems.

At the same time, under contemporary conditions, training should not be limited to unmanned aerial vehicles alone. The further development of military education should focus on the comprehensive study of interactions among UAVs, ground robotic systems (GRSs), digital command-and-control systems, information-processing tools, and decision-support technologies. This would enable future officers to develop not only the skills required to operate individual technological platforms but also the ability to integrate diverse unmanned and robotic capabilities into the performance of professional tasks.

We believe that an adaptive, blended, and competency-oriented training model offers a promising foundation for transforming military education. Within this model, educational content, teaching methods, and assessment procedures are continuously updated in response to technological developments and practical experience gained from the use of UAVs and GRSs. Such an approach may serve as one of the mechanisms for ensuring that the professional training of future officers meets the actual requirements of the contemporary security environment.

In their 2026 scientific article entitled “Development and Evaluation of a Ground Equipment-Integrated Control Simulator for Unmanned Aircraft System Training and Education,” Namwon An, Heejun Kim, and So-Young Jeong (2026) state that, to operate unmanned aerial vehicles (UAVs) effectively across a variety of military missions, operators must receive adequate training in UAV operating procedures. UAV operation training is generally conducted at specialised training centres.

Recently, UAV operational scenarios have become increasingly complex due to the growing number of airborne components and payloads, the adoption of many-to-many operational configurations involving ground control stations (GCSs) and UAVs, and the diversification of military UAV applications. Preparing personnel for complex UAV operational scenarios requires additional equipment and staff, as well

as larger training facilities, resulting in a substantial increase in training costs.

The authors report that, in order to reduce training costs, they developed a training simulator incorporating an integrated GCS, enabling operators to train for various mission scenarios within the deployed GCS environment. They subsequently evaluate the scope and levels of training provided by the simulator against North Atlantic Treaty Organization (NATO) standards and analyse its cost-effectiveness in terms of equipment and human resources *(An, N., Kim, H., & Jeong, S.-Y., 2026).*

An analysis of the study by An, N., Kim, H., and Jeoung, S.-Y. demonstrates that the increasing complexity of unmanned aircraft system (UAS) operational scenarios directly affects the requirements for organising military education and the professional training of operators. The growing number of airborne components, the diversity of payloads, multi-channel interactions between ground control stations (GCSs) and UAVs, and the expanding range of operational tasks necessitate a shift from traditional training formats towards technologically advanced training models capable of reproducing complex professional scenarios.

Simulation technologies are particularly promising in this context, as they make it possible to model various professional scenarios without the continuous use of actual platforms. Integrating a simulator with a ground control station creates opportunities to replicate the operational environment of a real UAV control system more closely, while enabling procedures to be practised repeatedly, performance to be assessed, and training tasks to become progressively more complex. Accordingly, simulation-based training should be regarded not merely as a means of reducing financial and resource expenditure but also as an important component of contemporary practice-oriented military education.

In our view, the next stage in the development of this approach should involve expanding the simulation environment beyond the training of operators of individual aerial platforms towards the comprehensive modelling of interactions among UAVs, ground robotic systems (GRSs), and other digital systems. This approach would enable future officers to develop not only individual operating skills but also

competencies in coordinating different unmanned platforms, analysing information, managing resources, and making decisions in a changing technological environment.

We believe that the resource efficiency of digital and simulation-based training lies in the use of virtualised scenarios, which can reduce the need for the continuous deployment of actual equipment, specialised training facilities, and large numbers of personnel, while ensuring the standardisation and repeatability of training procedures. For the professional training of future officers, this creates opportunities to transition towards a model in which some training tasks are performed in a digital environment, while practical exercises involving real equipment are used to verify and consolidate the competencies acquired.

In our view, the transformation of military education should involve the integration of real-world and virtual learning environments in which simulation technologies, UAVs, and GRSs function as interconnected components of professional training. This would facilitate the development of a more adaptive military education model in which the complexity of training scenarios can be progressively increased in accordance with learners' levels of preparedness, while learning outcomes can be assessed against standardised competency-based criteria.

We are convinced that simulation-based training should not replace practical training but rather complement it digitally, enabling the safe, repeatable, and resource-efficient development of future officers' competencies in the use of UAVs and GRSs.

In their scientific article entitled "Ground Robotic Systems in Modern Warfare: Trends, Capabilities, and Engineering Prospects," Shkvarsky, O., Rybschun, O., Koroleva, O., Ostrovsky, A., and Yaroshenko, O. *(2026)* conduct a comprehensive analysis of the development and practical application of ground robotic systems in contemporary combat operations, drawing on Ukraine's combat experience from 2022 to 2025.

The article examines current trends in the development of GRSs in the context of their employment in contemporary armed conflicts, with particular attention to the

expansion of their engineering capabilities and the prospects for developing unified, multifunctional platforms in Ukraine. Such platforms could serve as the basis for various types of GRSs designed to meet the operational requirements of military units and forces.

The methodological framework combines a systems-structural approach, a comparative analysis of the tactical and technical characteristics of domestic and foreign GRSs, and a content analysis of publicly available manufacturers' technical descriptions, analytical reports, scientific publications, and materials from the Brave1 Market platform.

The findings indicate that GRSs have undergone a gradual transformation from auxiliary technical assets into independent and functionally significant components of combat systems capable of performing logistical, engineering, and combat tasks. The authors identify the principal global trends in GRS development, including the predominance of modular platforms, increasing levels of autonomy, integration into digital command-and-control networks, enhanced resilience to electronic warfare, and a growing emphasis on minimising human presence in combat zones.

The article also systematises the structure and classification of Ukrainian GRSs according to their functional and tactical purposes and analyses the experience of large-scale employment of engineering GRSs for remote mining, demining, logistical support, and evacuation. The authors substantiate the conclusion that the widespread adoption of engineering GRSs contributes to reducing personnel losses, improving the effectiveness and safety of engineering operations, and creating the conditions for a transition towards a new paradigm of warfare based on the principles of stand-off engagement and technological autonomy.

Further development in this field should be based on the standardisation of modular platforms, the integration of artificial intelligence, the improvement of communication systems, and the establishment of a regulatory and legal framework governing the employment of combat variants of GRSs. The findings may be applied in the activities of engineering and combat units of the Armed Forces of Ukraine, in

the development of state programmes for military robotics, and in scientific research and military education *(Shkvarsky, O., Rybschun, O., Koroleva, O., Ostrovsky, A., & Yaroshenko, O., 2026).*

An analysis of current trends in the development and practical application of ground robotic systems demonstrates a qualitative transformation in their role in military activities—from auxiliary technical assets to functionally significant components of modern combat systems. The expanding range of GRS tasks, including logistics, engineering, evacuation, and combat operations, necessitates a corresponding update to the content of professional training for future officers. Consequently, robotic technologies should be regarded not merely as an object of technical training but as a new component of the professional competence of officers serving in the security and defence forces.

An important implication of the development of ground robotic systems (GRSs) for military education is the need to develop future officers' systematic understanding of robotic capabilities. Officers must be able to determine the suitability of a particular type of robotic platform, organise its interaction with personnel, unmanned aerial vehicles (UAVs), and other digital systems, assess the information obtained, account for technical limitations and risks, and make well-founded managerial decisions. Accordingly, professional training should gradually shift from mastering individual technical assets towards developing competencies in the management of robotic capabilities.

The integration of UAVs and GRSs into a unified educational environment is becoming particularly important. The development of modular platforms, autonomous systems, digital command-and-control networks, and artificial intelligence technologies creates the conditions for designing comprehensive training scenarios in which future officers learn to coordinate different types of unmanned systems. This makes it possible to move from teaching these technologies separately towards an integrated training model that prepares officers to manage interconnected aerial, ground-based, and digital capabilities.

In view of these developments, military education curricula should encompass not only technical subjects but also scenario-based modelling, simulation-based training, practical exercises, the analysis of actual experience in employing robotic systems, and interdisciplinary training scenarios. Particular importance should be attached to preparing officers to work with modular systems, digital control channels, autonomous functions, navigation systems, data analysis tools, and decision-support technologies. At the same time, the educational process must take into account the legal, ethical, and security implications of using autonomous and semi-autonomous systems.

We believe that the development of ground-based military robotics is one of the factors directly driving the transformation of military education. In our view, an adaptive training model for future officers offers a promising approach, whereby UAVs and GRSs are regarded as interconnected technological components, while the educational process develops officers' ability to integrate these capabilities into their professional activities. Such a model should be based on the integration of technological, managerial, analytical, practical, and competency-based training.

The methodological framework of this study is based on systems-based, competency-based, practice-oriented, and adaptive approaches, which make it possible to examine the transformation of military education as a comprehensive process involving changes to the content, formats, methods, and technologies of professional training for future officers of the security and defence forces. The systems-based approach was used to identify the interrelationships between the development of unmanned aerial vehicles (UAVs), ground robotic systems (GRSs), and digital technologies, and the changing requirements for officers' professional activities. The competency-based approach was employed to identify the new professional competencies required for the management and integrated employment of unmanned and robotic systems.

The study involved the analysis and synthesis of scientific publications, regulatory and legal documents, educational programmes, and contemporary

approaches to the professional training of military personnel. Particular attention was paid to research addressing officer training in UAV employment, the development of professional readiness to operate unmanned systems, the use of simulation technologies, and the advancement of ground robotic systems. The comparative method was used to examine traditional and technology-oriented models of military education and identify directions for their further transformation.

To determine the prospects for the practical implementation of the proposed approach, structural and functional analysis was employed to establish the relationships between the technological capabilities of UAVs and GRSs, officers' professional tasks, the competencies required to perform those tasks, and the corresponding components of the educational process. The modelling method was used to develop a conceptual sequence for transforming military education: development of unmanned and robotic technologies → changes in professional tasks → development of new competencies → updating of training content → implementation of simulation-based and practice-oriented learning → development of a technologically competent officer.

The method of synthesising practical experience was also applied to account for contemporary trends in the use of UAVs and GRSs, including their integration into digital systems, the application of simulation technologies, increasing autonomy, and the need for the comprehensive management of different unmanned platforms. Based on the combined application of these methods, the study develops the authors' conceptualisation of an adaptive model for transforming military education, aimed at preparing future officers to employ UAVs, GRSs, and digital systems comprehensively in their professional activities.

Main content of the article. An analysis of scientific publications indicates growing scholarly attention to the systematic modernisation of military education and the professional training of military personnel in accordance with contemporary capability requirements for defence forces. In this context, the Systems Approach to Training (SAT) methodology is of particular importance, as it conceptualises military

personnel training as an integrated system of interconnected processes, ranging from the identification of training needs and requirements to the evaluation of training effectiveness. In particular, Berchev and Stefanov substantiate the appropriateness of applying a systems approach to training within the military education system and emphasise the need to integrate educational and training processes. A key strength of this approach is that it focuses not merely on the transfer of knowledge but, above all, on developing the specific professional competencies and capabilities required to accomplish future service and combat tasks *(Berchev, D., & Stefanov, M., 2019).*

An important extension of this scholarly perspective is provided by the study conducted by Berchev and Stefanov *(2025),* which examines the theoretical foundations of structural and logical modelling of military personnel training within the higher military education system based on SAT. The authors substantiate the potential of applying a systems approach to align training objectives, educational content, teaching methods, and expected learning outcomes. This perspective is methodologically valuable because it creates the conditions for a transition from a predominantly subject-oriented model of military education to an outcomes-based and competency-oriented model, in which the ultimate criterion of quality is a graduate's ability to perform specified professional functions. At the same time, an analysis of this body of research indicates that the practical adaptation of SAT to the specific characteristics of Ukraine's contemporary military education system requires further scholarly investigation. This is particularly relevant in view of combat experience, the pace of technological change, and the need to update educational programmes promptly *(Berchev, D., & Stefanov, M., 2025).*

A distinct strand of research focuses on examining SAT through the lens of individual stages in the design of military training. In particular, Berchev and Stefanov *(2025)* emphasise the Design Phase, during which educational requirements are defined and the underlying structure of the future training system is established. This approach has considerable potential because it enables a logical and causal alignment between identified professional requirements, learning outcomes, the

content of educational components, training methods, and assessment procedures. Nevertheless, a critical analysis of the existing scholarly literature reveals that many studies focus primarily on the structural and methodological dimensions of SAT. By contrast, issues relating to the institutional transformation of higher military educational institutions, change management, the digitalisation of the educational environment, the integration of combat experience, and the establishment of continuous feedback mechanisms between operational forces and the education system receive comparatively less attention. These gaps constitute a promising direction for further research into the transformation of military education *(Berchev, D., & Stefanov, M., 2025).*

NATO Bi-Strategic Command Directive 075-007, Education and Individual Training Directive *(2025)*, is of considerable methodological significance for the development of this research area. It presents a systematic approach to training as a sequential cycle comprising Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation, and applies this framework to education and individual training. A key advantage of this approach is its capacity to ensure that transformation is cyclical and evidence-based: evaluation findings should inform a renewed analysis of training needs and the subsequent improvement of educational decisions.

However, the formal transposition of SAT provisions into military education practice cannot, in itself, be regarded as a sufficient condition for transformation. The methodology must be adapted to the national regulatory and legal environment, the structure of the military education system, the specific tasks of Ukraine's defence forces, actual combat experience, and the dynamics of military technological development. Thus, the analysis of scientific sources confirms the appropriateness of SAT as a methodological foundation for transforming military education while also identifying the need to develop an adapted model for its practical implementation in Ukraine's higher military educational institutions *(NATO SAT, 2025).*

On the basis of this analysis, we propose an original systems-based approach to training within the military education system for the preparation of security and

defence forces (Figure 2).

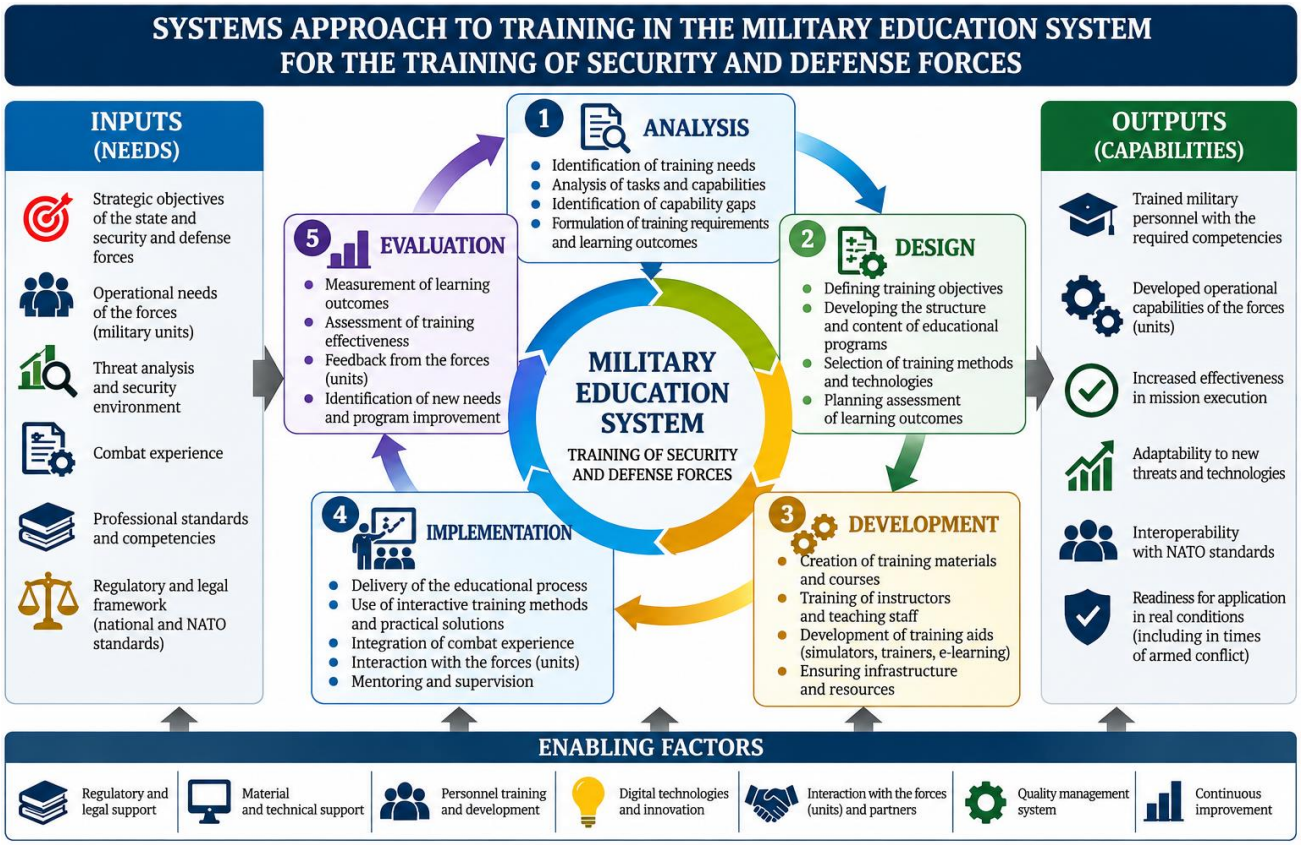

Figure 3. Systems approach to training in the military education system for the training of security and defense forces

It is important to emphasise the need to develop a proposed training programme for future officers of the security and defence forces that incorporates unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground robotic systems (GRSs) based on the NATO Systems Approach to Training (SAT) methodology. Such a programme should not be regarded as a separate specialised course focused on operating robotic platforms, but rather as an integral component of an officer's professional training, aimed at developing a comprehensive set of competencies for planning, organising, employing, and evaluating the effectiveness of unmanned technologies in the accomplishment of service and combat tasks. The relevance of this initiative is driven by the rapid development of robotic systems, the continuous evolution of their employment tactics, and the need to ensure the technological adaptability of future

officers.

The application of the NATO SAT methodology makes it possible to structure the proposed programme according to a clearly defined sequence: Analysis – Design – Development – Implementation – Evaluation. During the Analysis phase, it is advisable to identify the service and combat tasks in which UAVs and GRSs can support reconnaissance, surveillance, monitoring, logistical support, engineering operations, search and evacuation, facility protection, and other functions. During the Design phase, the expected learning outcomes and competencies required of future officers should be defined. These should range from understanding the technical capabilities of robotic systems to the ability to plan their employment, coordinate cooperation among units, assess the information obtained, and make well-founded managerial decisions.

During the Development phase, appropriate instructional and methodological materials, practical scenarios, training tasks, and simulation environments should be developed to combine theoretical instruction with practical exercises aimed at strengthening managerial and professional skills. Particular attention should be paid to the integrated employment of UAVs and GRSs, as their combined use can generate synergistic effects in information collection, situational monitoring, and decision support. At the same time, the programme content should incorporate actual combat experience, lessons learned from the operation of modern robotic systems, information and cybersecurity requirements, and interoperability standards applicable to units of the security and defence forces.

Thus, a proposed training programme for future officers that incorporates UAVs and GRSs and is based on the NATO SAT methodology could become a practical instrument for transforming contemporary military education. Its principal advantage should lie in its cyclical approach to continuous improvement: training evaluation results and feedback from operational units should be used to revise the educational programme's content, training scenarios, and instructional methods. This approach would ensure that the educational process remains aligned with the actual

needs of the security and defence forces, contribute to the development of technologically competent officers, and enable the establishment of an adaptive training model capable of responding promptly to the emergence of new unmanned and robotic technologies and changes in the nature of contemporary service and combat tasks.

The first and fundamental stage in implementing the NATO Systems Approach to Training (SAT) methodology is Analysis, which aims to identify the actual training needs of future officers of the security and defence forces in response to the nature of contemporary service and combat tasks, the development of unmanned technologies, and the transformation of unit employment methods. In the context of officer training, it is necessary to determine the specific professional functions they are expected to perform using unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground robotic systems (GRSs), the technological, managerial, information-analytical, and organisational competencies required to perform these functions, and the existing gaps between current and required levels of preparedness. An important source of information at this stage should be the practical experience of the security and defence forces, the outcomes of service and combat tasks, experience gained in employing robotic systems, professional standards, and the prospects for the development of relevant technologies.

The outcome of the Analysis phase should be a clearly defined training requirement for officers who are capable not only of operating individual robotic assets but also of integrating them into the system of task execution at unit level. It is advisable to identify a set of typical professional tasks, including planning the employment of UAVs and GRSs, coordinating their interaction with personnel, assessing the information obtained, managing robotic assets, organising information exchange, and evaluating the risks and effectiveness of their employment. Thus, the analysis should move beyond the question, “Which technologies need to be studied?” towards a broader question: “What capabilities must future officers possess to employ these technologies effectively under real-world conditions?”

During the Design phase, the findings of the analysis are translated into the structure of the future training programme. First and foremost, training objectives, expected learning outcomes, and the competencies required of future officers are defined. It is advisable to provide for the development of a set of interrelated competencies, including technological, tactical, managerial, information-analytical, communication, and legal competencies. At the same time, learning outcomes should be formulated in a manner that allows them to be measured objectively. For example, graduates should be able to justify the selection of a robotic system for a particular task, develop a plan for its employment, coordinate its use with the relevant unit, and assess the effectiveness of the task performed.

A distinctive feature of the Design phase should be the integration of UAVs and GRSs not as isolated academic subjects but as components of a unified system of professional officer training. This entails defining the structure of educational modules, the logical sequence in which they are delivered, the balance between theoretical and practical training, assessment methods, simulation-based learning, and practical training scenarios. The programme may include modules on the fundamentals of unmanned technologies; the management and planning of UAV employment; ground robotic systems; data analysis; geographic information systems (GIS) and digital technologies; cyber and information security; legal regulation; unit management; and decision-making. This structure would ensure that the educational programme aligns with the actual professional functions of officers.

The Development phase involves the practical creation of all programme components identified during the design process. At this stage, it is necessary to develop academic courses and modules, course syllabi, instructional and methodological materials, practical assignments, scenario-based and simulation-based training scenarios, learning outcome assessment criteria, and the corresponding material and technical infrastructure. Of particular importance is the creation of a training environment in which future officers can not only acquire theoretical knowledge of UAVs and GRSs but also practise planning, management, information

analysis, and decision-making processes.

An important component of Development should be the training of instructors and trainers capable of implementing the new training model. The use of modern robotic systems requires personnel to combine pedagogical, military-professional, and technological competencies. Provision should also be made for regularly updating training content in line with technological developments and practical experience of technology employment. Accordingly, Development should produce not a static collection of training materials but an adaptive educational system capable of responding promptly to technological and operational changes.

The Implementation phase involves the direct introduction of the developed programme into the educational process of a military educational institution. Its defining feature should be the integration of traditional forms of military education with practice-oriented, scenario-based, simulation-based, and technology-intensive learning. The training of future officers should approximate as closely as possible the conditions in which they will be required to make decisions and organise task execution. Therefore, the use of training simulators, digital simulations, virtual environments, practical exercises at training grounds, and comprehensive training scenarios involving UAVs and GRSs is advisable.

A key principle of programme implementation should be the integration of the educational process with the practical experience of units within the security and defence forces. Feedback from operational units will make it possible to identify training deficiencies in a timely manner, update scenarios, and adjust training content. At the same time, future officers should be trained not merely in operator skills but, above all, in managing the employment of robotic systems. This includes defining tasks, allocating resources, coordinating interactions, analysing results, and making decisions. Such an orientation makes it possible to move beyond training individual operators towards developing officers capable of effectively integrating technological capabilities into unit activities.

The Evaluation phase is a fundamental component of SAT, as it makes it possible to determine the extent to which the developed and implemented programme achieves its intended learning outcomes. Evaluation should not be limited to testing theoretical knowledge; above all, it should assess future officers' ability to apply the competencies they have acquired in practical situations. Appropriate assessment tools may include comprehensive practical assignments, scenario-based exercises, simulation scenarios, command-post exercises, portfolios of learning outcomes, and other competency-based assessment instruments. The criteria for effectiveness should encompass not only the accuracy of individual actions but also the soundness of managerial decisions, response time, the ability to adapt to changing circumstances, and the effectiveness of integrating UAVs and GRSs into task execution.

At the same time, Evaluation within the SAT methodology should not conclude with the assignment of a final grade to a cadet. Its strategic significance lies in generating feedback for the military education system as a whole. Evaluation results should be used to identify training gaps, improve the content of educational components, revise teaching methods, update practical scenarios, and modify the programme itself. Thus, Evaluation enables a transition to a cyclical model of continuous improvement: evaluation results → identification of new needs → renewed analysis → revision of the programme design. This cyclical process is one of the key advantages of SAT and provides the methodological foundation for developing an adaptive officer training system capable of responding to the dynamics of modern warfare, advances in UAV and GRS technologies, and transformations in the nature of service and combat tasks.

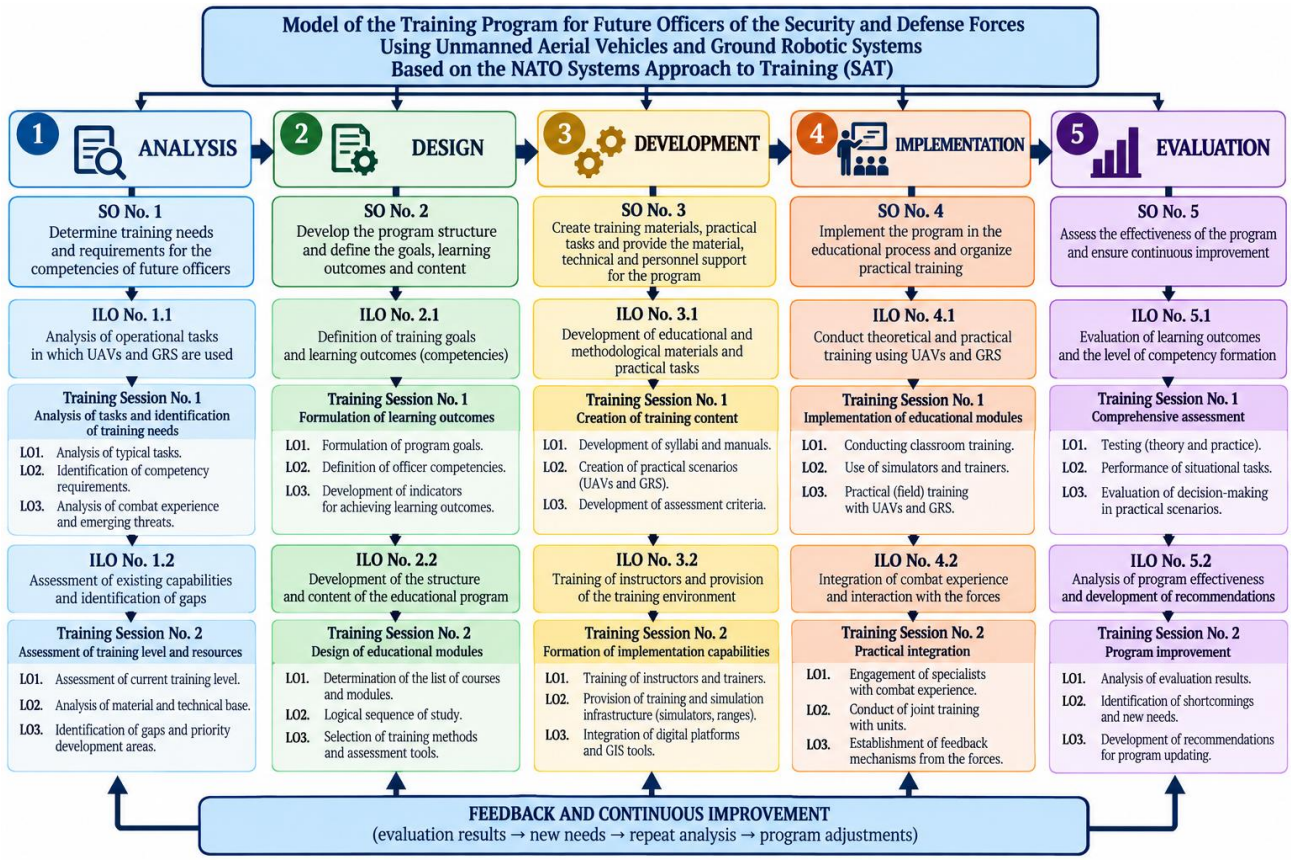

Figure 4. Model of the Training Program for Future Officers of the Security and Defense Forces Using Unmanned Aerial Vehicles and Ground Robotic Systems Based on the NATO Systems Approach to Training (SAT)

Conclusions. The findings of this study indicate that the transformation of military education in the context of the rapid development of unmanned and robotic technologies requires a shift from the traditional subject-oriented training model towards a systematic, competency-based, and outcomes-oriented model focused on developing specific professional capabilities in future officers. The NATO Systems Approach to Training (SAT) methodology provides an appropriate conceptual foundation for this transformation by ensuring a logical relationship between the identification of training needs, the design of learning outcomes, the development of instructional resources, the implementation of the educational process, and the evaluation of its effectiveness. Of fundamental importance is the fact that SAT makes it possible to conceptualise military education not as a collection of separate

academic disciplines but as an integrated, adaptive capability-development system that must continuously respond to changes in the nature of service and combat tasks, the technological environment, and the requirements governing officers' professional activities.

It has been substantiated that the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground robotic systems (GRSs) in the training of future officers should be regarded not merely as an area of technological specialisation but as an important component of the transformation of military education content. Their integration into the educational process creates opportunities to develop a set of interrelated technological, tactical, managerial, information-analytical, and communication competencies. Accordingly, future officers must be prepared not only to operate individual robotic systems directly but, above all, to plan their employment, organise coordination, analyse the information obtained, assess risks, make managerial decisions, and integrate technological capabilities into unit activities. This approach reflects the contemporary trend of moving away from training narrowly specialised technical operators towards developing officer-leaders capable of managing the integrated employment of advanced technologies.

The proposed training programme model, structured around the five sequential phases of Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation, provides a basis for ensuring the systematic organisation and internal coherence of the educational process. The Analysis phase identifies professional needs, tasks, and training gaps; Design establishes training objectives, competencies, and learning outcomes; Development involves creating the instructional and methodological resources, material and technical infrastructure, and personnel support required; Implementation ensures the practical delivery of the programme through simulators, training systems, practical and field exercises, and the integration of combat experience; and Evaluation measures the outcomes achieved and establishes feedback mechanisms. Importantly, the final phase does not terminate the process but initiates a new cycle: evaluation results → identification of new needs → renewed analysis →

programme adjustment. This cycle establishes a mechanism for the continuous improvement of military education.

We believe that the NATO SAT methodology can be regarded as an effective instrument for the systematic transformation of the training of future officers of Ukraine's security and defence forces, particularly in an environment characterised by rapid technological change and the continuous evolution of methods for accomplishing service and combat tasks. Promising directions for further research include the practical piloting of the proposed model at higher military educational institutions; the development of relevant educational components and criteria for assessing competency acquisition; the determination of an optimal balance between theoretical, simulation-based, and practical training; and the establishment of a mechanism for continuously integrating the experience of operational units into educational programme content. Thus, combining the NATO SAT methodology with the systematic use of UAVs and GRSs can facilitate the transition towards an adaptive model of military education focused not merely on knowledge acquisition but on developing officers' actual capabilities to operate effectively in the contemporary and future security environment.

Reference:

Kryvoruchko, V. (2026). Structure and components of professional readiness of future National Guard of Ukraine officers for unmanned aerial vehicles application: Pedagogical aspect. Collection of Scientific Works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Pedagogical Sciences, 45(2), 85–99. https://doi.org/10.32453/pedzbirnyk.v45i2.2130

Heorhiiev, V., & Tkhorzhevskyi, D. (2025). Analysis of modern training programs for Special Operations Forces specialists in the use of unmanned aerial vehicles. Collection of Scientific Works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Pedagogical Sciences, 41(2). https://doi.org/10.32453/pedzbirnyk.v41i2.1875

Didenko, O. V., Snitsa, T. Y., Demianiuk, Y. A., Androshchuk, O. Y., & Korchev, V. B. (2025). Trends in professional training of officers in the security and defense sector of Ukraine under the legal regime of martial law. Collection of Scientific Works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Pedagogical Sciences, 40(1), 23–41. https://doi.org/10.32453/pedzbirnyk.v40i1.1811

Tong, T., & Wu, Q. (2023). Exploration of UAV course teaching in military academy under mixed teaching mode. Journal of Education and Educational Research, 2(1), 81–83. https://doi.org/10.54097/jeer.v2i1.5543

An, N., Kim, H., & Jeoung, S.-Y. (2026). Design and evaluation of a ground control station-

embedded training simulator for unmanned aerial systems. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 29(4), 515–523. https://doi.org/10.9766/KIMST.2026.29.4.515

Shkvarsky, O., Rybschun, O., Koroleva, O., Ostrovsky, A., & Yaroshenko, O. (2026). Ground robotic complexes in modern warfare: Trends, opportunities and engineering prospects. Collection of Scientific Works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, 1(27), 132–139. https://doi.org/10.37701/dndivsovt.27.2026.15

Berchev, D., & Stefanov, M. (2019). The systems approach to training in the military educational system – aggregation of integration processes. Knowledge International Journal, 30(6), 1457–1462. https://doi.org/10.35120/kij30061457B

Берчев, Д., & Стефанов, М. (2025). Теоретичні засади структурно-логічного моделювання підготовки військових фахівців у системі вищої військової освіти на основі SAT. Збірник наукових праць «Військова освіта», (51), 97–119. https://doi.org/10.33099/2617-1783/2025-51/97-119

Berchev, D., & Stefanov, M. (2025). Design of the training – approach for identification of the requirements to the educational process in the military education system. Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference, 5, 100–106. https://doi.org/10.17770/etr2025vol5.8465

NATO. (2022). Bi-SC Directive 075-007: Education and Individual Training and the Systems Approach to Training (SAT). NATO.

NATO. (2023). NATO Systems Approach to Training (SAT): Reference Curriculum / Instructor Development. NATO Deep.

NATO. (2026). NATO Systems Approach to Training (SAT). NATO Education and Individual Training Programme.

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-122
UDC 378.091.212:001.89

CHAPTER 4.
STUDENT SCIENTIFIC COMPETITIONS AS A FACTOR IN THE PROFESSIONAL GROWTH OF FUTURE SPECIALISTS

Ganna GNYLOSKURENKO
PhD, Associate Professor of the Department of Pediatrics,
Obstetrics and Gynecology, Educational and Scientifi
c Centre "Institute of Biology and Medicine"
Taras Shevchenko National University of Kyiv
(Academician Glushkov Avenue, 2, Kyiv)
annagn@knu.ua
https://orcid.org/0000-0003-4141-4579

Abstract. The chapter analyzes the role of non-formal scientific and educational events in the system of professional training and career growth of future specialists. It provides a comprehensive characterization of various intellectual competition formats, including Olympiads, scientific and simulation tournaments, brain-rings, and research paper competitions. A comparative analysis of Ukrainian and international approaches to evaluating students' competitive research projects is conducted. The role of simulation competitions, case championships, and brain-rings in developing clinical reasoning, patient safety protocols, and teamwork skills under time constraints is highlighted. The importance of overcoming psychological barriers and the significance of constructive feedback from reviewers and jury members in maintaining high motivation among young researchers are emphasized.

Keywords. Scientific tournament, medical students, scientific competitions, professional development, student motivation.

СТУДЕНТСЬКІ НАУКОВІ КОНКУРСИ ЯК ЧИННИК ПРОФЕСІЙНОГО ЗРОСТАННЯ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ

Аннотація. У розділі проаналізовано роль неформальних науково-освітніх заходів у системі фахової підготовки та професійного зростання майбутніх спеціалістів. Наведено комплексну характеристику різних форматів інтелектуальних змагань: олімпіад, наукових і симуляційних турнірів, брейн-рингів та конкурсів наукових робіт. Проведено порівняльний аналіз вітчизняних та міжнародних підходів до оцінювання конкурсних наукових розробок студентів. Висвітлено роль симуляційних змагань кейс-чемпіонатів, брейн-рингів у розвитку клінічного мислення, алгоритмів безпеки пацієнтів і командної взаємодії в умовах обмеженного часу. Підкреслено важливість подолання психологічних бар'єрів та значення конструктивного зворотного зв'язку від рецензентів і членів журі для збереження високої мотивації молодих науковців.

Ключові слова: Наукові турніри, студентські олімпіади, конкурси наукових робіт, професійний розвиток. мотивація студентів.

Вступ. Сучасний етап розвитку вищої освіти вимагає від освітніх закладів системного перегляду підходів до забезпечення якості освітнього процесу, щоб належним чином підготувати студентів до умов динамічного середовища. Академічні моделі навчання поступово замінюються на студентсько-центричні та компетентнісні підходи. Все більше у практику викладання запроваджуються новітні інтерактивні методики викладання, активне залучення здобувачів освіти до неформальних науково-практичних заходів. Розкриття творчого та аналітичного потенціалу студентів покращується у поєднанні формального навчання в аудиторії з позааудиторною науковою діяльністю студентів. Неформальні наукові заходи — олімпіади, конкурси науково-дослідних робіт, брейн-рінгі, кейс-чемпіонати та наукові турніри — виступають дієвим каталізатором розвитку критичного мислення, командної роботи та професійних компетентностей майбутніх фахівців. Студентські конкурси можуть відігравати важливу роль, залучаючи студентів до інноваційної та дослідницької діяльності. Відома концепція «трикутника знань» наголошує на визначальній ролі вищої освіти, підкреслюючи взаємозалежність освіти, наукових досліджень та інновацій, які є ключовими рушійними силами суспільства, заснованого на знаннях.

Сучасні освітні практики ,які впроваджуються в шкільній та вищій освіті включають проектне навчання, STEM-освіту та гейміфікацію. Роль гри, як фундаментального інструменту освітнього процесу була представлена в концепції Джона Дьюї “навчання через дію” (learning by doing). На думку вченого в соціальній взаємодії народжується критичне мислення, оскільки молодий дослідник змушений зіставляти свій досвід із досвідом інших, аргументувати свою позицію та знаходити компроміси. *(Нємцев А.,2026).*

Різноманітні заходи, які проводяться в навчальних закладах сприяють виявленню, розвитку та реалізації творчих здібностей студентів. За результатами статистичного аналізу українських дослідників *(Заєць С. В., Юдіна С. П., 2020)* до початку війни в Україні проходило приблизно 300 міжнародних та всеукраїнських інтелектуальних змагань, таких як міжнародні олімпіади, міжнародні конкурси наукових робіт, міжнародні професійні творчі конкурси, міжнародні турніри, міжнародні конференції, всеукраїнські олімпіади, що значною мірою сприяло розкриттю творчого потенціалу молодих талантів.

Участь у таких заходах є добровільною і не зважаючи на позитивне ставлення до наукових конкурсів більшості студентів це не завжди автоматично перетворюється на намір узяти в них участь. Хоча студенти усвідомлюють переваги участі — такі як розвиток навичок і професійне зростання, — самого лише цього розуміння замало, щоб спонукати їх до дії. Аналітичні дослідження L. Molnar та співавт. *(Molnár L., Hajdú N., Nagy S., 2026)* підкреслюють, що для подолання таких перешкод як страх невдачі, високий рівень конкуренції, відсутність необхідних компетенцій потрібні додаткові стратегії, в яких значну роль грає підтримка з боку викладачів та студентів. Впровадження програм менторства, у межах яких досвідчені студенти, викладачі та фахівці надають підтримку й заохочення, може сприяти формуванню культури участі в наукових конкурсах. Крім того, створення спеціалізованих спільнот, наукових гуртків кафедр, наукових товариств на рівні університету орієнтованих на наукову діяльність, покращує взаємну підтримку та співпрацю, додатково посилюючи мотивацію студентів до участі в таких заходах. Інвестиції в освітні ініціативи, спрямовані на вдосконалення вмінь студентів проводити дослідження, робити презентації, володіти мовою та здійснювати огляд літератури, можуть забезпечити їх необхідними інструментами для досягнення успіху в наукових конкурсах.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвиткуосвіти і науки традиційні підходи, орієнтовані переважно на пасивне засвоєння теоретичних знань у межах аудиторних занять, виявляють свою недостатню ефективність у формуванні практичних компетентностей, критичного мислення та готовності студентів до вирішення складних професійних завдань. Пошук і впровадження інноваційних методик для підвищення мотивації до навчання, поглиблення знань з суміжних дисциплін, покращення науково-дослідницького потенціалу дозволяє доповнити формальну освіту. Водночас, попри очевидні переваги таких форматів, постає проблема психологічної неготовності студентів, їх внутрішні бар'єри, недостатня підтримка з боку викладачів, відсутність чітких стратегій і навичок менторства. Тому, метою даного розділу є порівняльна характеристика студентських наукових заходів, як чинників підвищення якості освіти та фахового зростання студентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Студентські науково-освітні заходи - система інтелектуальних змагань, які організовує Міністерство освіти і науки України та Інститут модернізації змісту освіти для пошуку та підтримки талановитої молоді. Серед них студентські олімпіади, конкурси наукових робіт, наукові турніри, творчі конкурси. Характеристика цих заходів, мета їх проведення та аналіз їх ефективності висвітлено в наступних публікаціях..

Студентські предметні олімпіади. Це система змагань у застосуванні здобутих знань, умінь і навичок серед студентів. Це змагання з гуманітарних, соціально-економічних, технічних дисциплін для заохочення талановитих студентів, які мають глибокі знання. На думку викладачів *(В. Шепітько та ін 2021)* ступінь складності завдань вимагає від студентів не тільки застосування знань, набутих під час лекцій та практичних занять, а також володіння матеріалом з додаткових джерел, що дозволяє розширити науковий та культурний кругозір.

Олімпіади проводяться щорічно з метою підвищення якості підготовки фахівців, системного вдосконалення навчального процесу, активізації навчально-пізнавальної діяльності студентів. Проведення олімпіади регламентується Наказом МОН № 1410 від 13.12.2012 «Про затвердження Положення про проведення Всеукраїнської студентської олімпіади» *(Про затвердження Положення про проведення Всеукраїнської студентської олімпіади : Наказ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України від 13.12.2012 № 1410)*

Олімпіада проводиться у два етапи.

І етап – з навчальної дисципліни, спеціальності (напряму) у вищому навчальному закладі серед студентів, які в ньому навчаються.

ІІ етап – у базових вищих навчальних закладах з відповідних навчальних дисциплін, спеціальностей (напрямів), перелік яких затверджується наказом Міністерства освіти і науки України.

У І етапі Олімпіади беруть участь всі бажаючі студенти вищих навчальних закладів ІІІ-ІV рівнів акредитації незалежно від форм власності та підпорядкування, у тому числі іноземці, що навчаються у цих вищих навчальних закладах.

Переможці І етапу визначаються оргкомітетом вищого навчального закладу, на підставі рекомендацій журі і стають учасниками ІІ етапу Олімпіади, список яких затверджується наказом ректора. Дипломом І ступеня нагороджується учасник, який набрав не менше 80%, ІІ ступеня - 70%, ІІІ ступеня - 60% від максимально можливої сумарної кількості балів, що дорівнює 100%. При цьому кількість переможців не може перевищувати 10% від загальної кількості учасників. Дипломом І ступеня нагороджується один учасник. Якщо рівну кількість балів набрали декілька учасників, які претендують на нагородження дипломом І ступеня, між ними призначається додатковий тур.

За статистичними даним за останні десятиліття перед війною кількість учасників студентських олімпіад становила близько 14 000 студентів по всій Україні, при чому найбільш активними були студенти м.Київ та Харківської та Львівської областей. Активно приймали участь і студенти Одеської, Дніпропетровської, Запорізької, Полтавської, Сумської та Тернопільської областей. *(Заєць С. В., Юдіна С. П., 2020)*

Міжнародний досвід проведення студентських олімпіад суттєво еволюціонував: від традиційних перевірок теоретичних знань світова вища школа перейшла до комплексних змагань із розв'язання реальних практичних завдань (Problem-Based & Project-Based Learning), інтеграції автоматизованих систем оцінювання та створення міжнародних освітніх хабів.

Міжнародні студентські олімпіади розрізняють за специфікою предметних галузей та форматом проведення.

Формат проведення:

1.Командний алгоритмічний формат (ICPC — International Collegiate Programming Contest).

Академічні дослідження формата ICPC зосереджені на вивченні алгоритмічних навичок, особливостях командної роботи та впливі автоматизованого оцінювання на освітній процес. Luo, Z. та співавтори *(Luo Z., Dickey E., 2025)* зазначають, що різноманітні формати змагань слугують надійними показниками рівня майстерності учасників і ймовірних результатів змагань. Міжнародна олімпіада з інформатики (IOI) та Міжнародна студентська олімпіада з програмування (ICPC) —два найпрестижніші змагання у світі спортивного програмування, кожне з яких має свої унікальні освітні та розвивальні цілі. При порівнянні цих заходів Can, T., Farrell, R. та співавт *(Can T., Farrell R., Lim C. Y., 2026)* зазначають, що IOI зосереджується на індивідуальних досягненнях учнів шкіл, сприяючи розвитку інноваційного мислення та креативності, тоді як ICPC робить акцент на командній роботі та співпраці студентів університетів. На думку авторів командний формат за

одним комп'ютером стимулює розвиток комунікації, тайм-менеджменту та розділення ролей у команді.

2. Індивідуальний фундаментальний формат (IMC — International Mathematics Competition).

Змагання проходить у 2 тури (по 5 годин кожен), у кожному турі надається по 4–5 розгорнутих задач proof-based. Дослідження математичних змагань вищої школи, представлені в Офіційних збірниках та матеріалах International Mathematics Competition for University Students *(International Mathematics Competition for University Student: official website. URL: https://www.imc-math.org.uk/),* аналізують специфіку створення proof-based задач, методологію оцінювання та прогредієнтну складність, структуру координаційних комісій (Coordinators) та аналізують типові помилки студентів під час розв'язання задач вищої математики, аналізу й алгебри.

3.Інженерно-проєктний та Хакатон-формат (Formula Student, Hackathons).

Прикладом цих заходів є змагання Formula Student, які передбачають, що студенти розробляють концепцію, проєктують і виготовляють невеликі гоночні автомобілі формульного типу, а також змагаються на них. Особливостями проведення такого типу заходів – це поєднання інженерії, програмування, економіки та презентаційних навичок. Студенти захищають бізнес-план, технічну документацію та презентують діючий прототип перед представниками індустрії. Helena Ortwein та S. Heußner *(Ortwein H., Heußner S.,2016)* описують практичну освітню модель P2M (Project & Program Management), за якої студенти під час змагання проходять повний цикл — від розробки концепції та бізнес-плану боліда до захисту перед технічними експертами ринку.

4.Медичні, біологічні та клінічні кейс-олімпіади (Case Competitions).

Академічні праці у галузі медичної освіти розглядають кейс-олімпіади як інструмент формування клінічного мислення, міжпрофесійної взаємодії та

симуляційного навчання. Розв'язання симуляційних клінічних або наукових кейсів включає роботу з віртуальними пацієнтами, аналіз результатів лабораторних та інструментальних досліджень. Оцінюється командна взаємодія, швидкість прийняття рішень у критичних ситуаціях та застосування принципів доказової медицини (Evidence-Based Medicine).

Дослідники Razzaq, S., Brouillette, K., та інш *(Razzaq et al.,2025)* описують конкурс кейсів McGill Healthcare-Management, який був розроблений для розширення охоплення та розуміння студентами-медиками питань управління операціями та покращення якості. Для проведення конкурсу використовувались реальні операції в галузі охорони здоров'я та пов'язані з ними проблеми.

Kristine Talley та співавтори *(K.Talley et al ,2021)* в своїй статті про участь студентів медичних спеціальностей у віртуальних змаганнях Geriatric case competition підкреслюють, що командний розбір складних симуляційних пацієнтів підвищує рівень міждисциплінарної співпраці студентів-медиків та ефективність прийняття клінічних рішень.

Удосконалення якості та безпека пацієнтів є ключовими елементами професійної підготовки медичних працівників, де особлива увага приділяється міждисциплінарній командній роботі. Ініціатива THINQ (Healthcare Improvement and iNnovation in Quality) при Каліфорнійському університеті в Лос-Анджелесі , створена в межах Програми забезпечення якості Департаменту внутрішньої медицини (DoM) системи UCLA Health, започаткувала конкурс кейсів THINQ, щоб усунути прогалину в навчанні студентів принципам удосконалення якості. Команди складалися з трьох-п'яти студентів, які аналізували проблеми охорони здоров'я за допомогою процесів покращення якості та пропонували потенційні рішення на основі доказів. Фінальні презентації оцінювали медичні працівники. На думку авторів Caitlin Chen та інш *(C. Chen et al., 2026)* цей міжпрофесійний конкурс розвитку творчого підходу, співпраці та дослідницької діяльності, залучаючи команди студентів і

нещодавніх випускників до застосування принципів удосконалення якості для вирішення реальних проблем у сфері охорони здоров'я.

Ключові технологічні та організаційні тренди.

З переходом частини етапів в онлайн міжнародні олімпіади застосовують суворі протоколи контролю:

1.Онлайн-прокторинг та кібербезпека

- *Automated & Human Proctored Systems:*

Запис екрана, камери та мікрофона з AI-аналізом аномалій поведінки. Системи відеоспостереження та штучного інтелекту контролюють поведінку учасника від моменту входу в систему до завершення здачі робіт.

- Офіційні правила ICPC щодо онлайн-прокторингу (ICPC Regional Rules) (*International Collegiate Programming Contest : official website. URL: https://icpc.global)* — правила проведення регіональних та півфінальних відборів ICPC у віддаленому форматі, що регламентують вимоги до запису камери, екрана та робочого місця. Приклад із змагань (ICPC Qualifiers): Учасник складає відбірковий тур з дому. Система синхронно веде запис із трьох джерел: камери ноутбука, екрана та веб-камери смартфона (під кутом 45градусів щоб бачити руки та монітор).
- Правила та інструкція прокторингу (запис відео, перевірка кількох моніторів та аналіз підозрілих дій). *(FAQ online proctoring. Erasmus University Rotterdam : official website. URL: https://www.eur.nl/en/education/practical-matters/examinations/faq-online-proctoring)*
- Опис роботи алгоритмів AI-прокторингу (Gaze Tracking — відстеження напрямку погляду, зауваження сторонніх осіб та аудіо-аналіз аномалій), (*GazeRecorder - Eye Tracking Software : official website. URL: https://gazerecorder.com*). Якщо учасник регулярно відводить очі вбік (наприклад, вниз праворуч, де може лежати конспект або телефон), штучний інтелект фіксує аномалію та ставить часову мітку для подальшої перевірки екзаменатором. Алгоритм реагує на сторонні шуми, шепіт або появу в кадрі

іншої людини. Наприклад, якщо під час змагання до кімнати хтось входить або лунає сторонній голос, система надсилає сповіщення про потенційне порушення. Штучний інтелект фіксує нетипові патерни набору тексту. Раптове вставлення великого фрагмента коду або тексту з буфера обміну (Paste) без попереднього посимвольного набору оцінюється як потенційна зневага правилами.

- *Safe Exam Browsers (SEB):*

Для запобігання списуванню олімпіадна платформа вимагає запуску через спеціальний кастомний браузер (Safe Exam Browser) (*News. Safe Exam Browser : official website. URL: https://safeexambrowser.org/news_en.html*). Браузери із захищеним середовищем перетворюють комп'ютер учасника на ізольований термінал для виконання одного завдання. Студент не має можливості відкрити додаткові вкладки (Telegram, Discord, ChatGPT Desktop) та засоби відділенного доступу (AnyDesk або TeamViewer). Вимикається функція скриншотів та комбінації для перемикання між вікнами. Браузер дозволяє переходити лише за суворо визначеними адресами (наприклад, тільки на сервер олімпіади чи до бази нормативних документів) і повністю закриває доступ до пошукових систем, месенджерів.

Дослідницькі олімпіади (Research Olympiads). Сучасні олімпіади (наприклад, *International Research Olympiad*) переходять від стандартного розв'язання задач до аналізу наукових публікацій.

Учасникам олімпіади дається наукова стаття (Primary Research Paper), і вони повинні за короткий час проаналізувати методологію, валідність вибірки, статистичну значущість результатів та запропонувати обмеження досліджень.
На відміну від класичних олімпіад, International Research Olympiad (IRO) (*About IRO. International Research Olympia: official website. URL: https://www.internationalresearcholympiad.org/about-iro.*) надає студентам можливості розширити свій науковий світогляд, навчитись аналізувати наукові публікації.

Аналіз методології та дизайну дослідження. Наприклад, учасникам надається фрагмент розділу *Methods* із сучасної статті про клінічне випробування нового медикаментозного препарату або вакцини.

Завдання: Визначити, чи правильно обрано контрольну групу, сформулювати потенційні систематичні помилки (biases) у вибірці пацієнтів та пояснити, чому обраний статистичний критерий є доречним (або недоречним) у цьому випадку.

- *Інтерпретація графіків та результатів (Data Interpretation)*

Наприклад, пропонують розглянути оригінальні графіки (наприклад, діаграма Каплана — Мейєра для виживаності пацієнтів або теплова карта експресії генів) із розділу *Results*.

Завдання: Проаналізувати статистичну значущість та відповісти на запитання: «Чи підтверджують представлені графіки первинну гіпотезу авторів, чи наведені дані допускають інше трактування?».

- *Пошук обмежень та критична оцінка (Limitations & Future Directions)*

Наприклад, надається повний текст статті з абстрактом, але з вилученим розділом *Discussion/Limitations*.

Завдання: Сформулювати 3–4 ключових обмеження проведеного дослідження (наприклад, мала вибірка, відсутність тривалого спостереження, нестача аналізу побічних ефектів) та запропонувати дизайн наступного експерименту, який дозволить перевірити ці прогалини.

Підготовка до проведення олімпіади- важлива складова її ефективності , тому організатори заходів максимально інформують учасників про правила проведення, основні вимоги та матеріали для підготовки. Sevalho, I. C., та співавт. *(Sevalho I. C., Ramchandani M., dos Santos N. V. G. 2025)* розробили систему мобільних додатків, призначену для учнів старших класів та студентів бакалаврату, які цікавляться національними олімпіадами з природничих наук.

Це допомагає забезпечити доступну платформу з навчальними матеріалами, такими як відео, тексти, результати минулих іспитів, тести та картки.

Конкурс студентських наукових робіт. Це один із ключових форматів апробації досліджень здобувачів вищої освіти. В Україні та інших країхнах він функціонує як відбір перспективних наукових розробок із їхнім подальшим захистом та публікацією. Конкурс проводиться щороку з метою створення умов для розвитку інтелектуального потенціалу талановитої молоді, підтримки наукової та творчої роботи студентів (курсантів), стимулювання їх інтересу до дослідницької роботи, оволодіння ними інноваційними технологіями.

Проведення конкурсу регламентується Наказом МОН №605 від 18.04.2017 «Про затвердження положення про Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» *(Про затвердження Положення про Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей : Наказ Міністерства освіти і науки України від 18.04.2017 № 605)*

Згідно з положенням основними завданнями Конкурсу є:

- виявлення та розвиток обдарованих студентів, сприяння реалізації їх здібностей;

- стимулювання творчого самовдосконалення студентської молоді;

- популяризація досягнень науки, техніки та інноваційних технологій;

- залучення провідних вчених, наукових, науково-педагогічних працівників до активної роботи з обдарованою студентською молоддю;

- формування команд для участі в міжнародних олімпіадах, конкурсах, турнірах.

На конкурс подаються самостійно підготовлені наукові роботи студентів з галузей знань, спеціальностей. У наукових роботах, що подаються на конкурс, у тому числі в копіях патентів, наукових статей тощо, прізвища, ініціали автора

(авторів) та наукового керівника, найменування вищого навчального закладу замінюються шифром.

Конкурс проводиться у два тури:

І тур - у вищих навчальних закладах;

ІІ тур - у базових вищих навчальних закладах.

ІІ тур Конкурсу проводиться у два етапи:

перший етап - рецензування робіт;

другий етап - проведення підсумкової науково-практичної конференції.

Наукові роботи переможців Конкурсу оприлюднюються на веб-сайті базового вищого навчального закладу.

Міжнародні конкурси студентських наукових робіт — проводяться з метою об'єднання молодих науковців зі всього світу, залучення студентства до розв'язання актуальних наукових і практичних проблем.

Більшість міжнародних оргкомітетів висувають єдині суворі стандарти до матеріалів, що подаються:

1. Мова та стиль: Виключно наукова англійська мова (Academic English).

2. Анонімність (Blind Peer Review): Робота подається під шифром або код-ідентифікатором. Назву ЗВО, прізвища автора та керівника видаляють із основного тексту та метаданих файлу.

3. Структура наукової статті (IMRaD):

- Introduction: Обґрунтування актуальності, новизни та мети.
- Methods: Детальний опис методології, статистичного апарату, дизайну дослідження чи біоетичних дозволів.
- Results: Власні дослідження з графіками, таблицями та статистичними показниками .
- Discussion: Порівняння власних даних із результатами світових публікацій.

4. Академічна доброчесність: Обов’язкова перевірка за допомогою спеціалізованих програм

Приклади конкурсів наукових робіт:

- *International Competition of Student Scientific Works, «Black Sea Science» (Міжнародний конкурс студентських наукових робіт)*:

В цьому конкурсі можуть приймати участь студенти різних спеціальностей Харчова наука і технології, Економіка і управління, Інформаційні технології, автоматизація і робототехніка, Енергетика та енергоефективність ,Екологія та охорона навколишнього середовища, Туризм та готельно-ресторанна справа

Конкурс проводиться консорціумами європейських та українських вишів (наприклад, під патронатом мереж закладав вищої освіти Чорноморського регіону BSUN або європейських університетів-партнерів). Інформація для студентів представлена на сайті заходу. *(International Student Competition "Black Sea Science 2026". Odesa National Task Force University : official website. URL: http://isc.ontu.edu.ua/2026-2/?lang=en)*

Мова проведення: Англійська (та/або офіційні мови країн-учасниць).

Формат проведення: I тур — заочна рецензійна оцінка наукової статті/роботи; II тур — онлайн або очний захист (презентація, відповідей на запитання міжнародного жюрі).

- *Global Undergraduate Awards* Це провідна світова програма відзначення найкращих студентських робіт, яка представляє ці роботи міжнародній аудиторії та об’єднує студентів із різних культур і дисциплін. Переможці отримують публікацію у міжнародній базі та запрошення на глобальний саміт у Дубліні. Конкурс проподиться для студентів понад 25 спеціальностей від медичних і біологічних наук до філософії та інженерії. *(Global Undergraduate Awards : official website. URL: https://undergraduateawards.com/).*

- *International Student Science Fair*

Це щорічний захід, що слугує майданчиком для міжнародної взаємодії у сфері природничо-наукової освіти. Ярмарок об'єднує учнів старших класів, учителів та керівників шкіл задля обміну досвідом і розвитку практик навчання та викладання, пов'язаних із науковими дослідженнями та освітою. *(Grand Award Judging Criteria. Society for Science: official website. URL: https://www.societyforscience.org/isef/grand-award/criteria/)*

- *IEEE Student Paper Contest (Конкурс наукових праць IEEE):*

Проводиться інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE). Переможні роботи публікуються у наукометричній базі IEEE Xplore.

Конкурс проводиться за спеціальностями : Інженерія, IT, електроніка, телекомунікації, штучний інтелект. Деталі конкурсу та можливості публікації робіт та спілкування з однодумцями представлені на сайті *(Contests for Students. IEEE Students : official website. URL: https://students.ieee.org/student-opportunities/contests-for-students)*

- *Medical Student Research Competitions*

Конкурси наукових робіт за спеціальностями медицина, педіатрія, гастроентерологія, громадське здоров'я проводяться профільними медичними асоціаціями у межах щорічних конгресів. Переможці отримують travel-гранти на участь у конференціях та публікацію тез у фахових журналах (Scopus / Web of Science).

Прикладами таких заходів є:

1. Young talents in internal Medicine *(Young Talents. EBM : official website. URL: https://my.ebm.one/young-talents.)* - — це міжнародний конкурс для молодих лікарів-інтернів, які цікавляться науковою діяльністю; він демонструє підхід до навчання на основі вирішення клінічних завдань із використанням реальних ситуацій із лікарської практики.

2. The Council for International Organizations of Medical Sciences . Медичні організації із присудженням гранту для публікації наукових

досліджень для студентів. *(CIOMS establishes annual award for medical students. Council for International Organizations of Medical Sciences (CIOMS) : official website. URL: https://cioms.ch/cioms-establishes-annual-award-medical-students/ .)*

3. The Academic Pediatric Association Research Network Young Investigator Award *(APA / Continuity Research Network (CORNET) Young Investigator Awards Program. Academic Pediatric Association : official website. URL: https://www.academicpeds.org/programs-awards/research-funding-program/young-investigator-awards-program/programs-awards-young-investigator-awards-program-apa-crn-yia/)*

4. IJMS World Conference of Medical Student Research - — це міжнародна наукова конференція, створена для студентів-медиків та молодих фахівців, які нещодавно здобули медичну освіту. Вона забезпечує структуровану платформу для презентації результатів досліджень, отримання наукових відгуків, налагодження контактів із колегами з усього світу та участі в глобальному обміні медичними знаннями. *(Conference. International Journal of Medical Students (IJMS) : official website. URL: https://ijms.info/IJMS/Conference/welcome)*

Оцінювання студентських наукових робіт є важливою частиною цих заходів, оскільки чіткі та прозорі критерії оцінювання допомагають студентам отримати зворотній з'язок, покращити свою наукову діяльність в подальшому та підвищити свою мотивацію .

Порівняльна оцінка наводиться в таблиці 1, підготованою з використанням рекомендацій викладених Положенні про Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей України. та міжнародним конкурсом International Student Science Fair (Regeneron ISEF / Society for Science). Варто зауважити. що міжнародні рецензенти (Peer Reviewers) оцінюють роботи за критеріями, подібними до оцінювання статей у наукометричних журналах.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика критеріїв оцінювання студентських наукових робіт.

Складова / Категорія	**Міжнародний конкурс (Regeneron ISEF)**	**Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт**
Загальна система оцінювання	max 100 points (100 балів)	100 балів
Актуальність, новизна та оригінальність	Research Question - 10 балів: Постановка ідеї, чіткість проблеми та практична/теоретична важливість.	Актуальність проблеми -10 балів, Новизна та оригінальність ідей -15 балів
Методологія та виконання дослідження	Дизайн та методологія - 15 балів Виконання (Execution). В залежності від видо наукової роботи: Науковий проект -20 балів Збір, аналіз та інтерпретація даних Інженерний проект - 20 балів Виготовлення та випробування . Креативність і потенційний вплив -20 балів	Використані методи дослідження -15 балів, Теоретичні результати -10 балів, Практична направленість та документальне підтвердження впровадження - 20 балів
Самостійність та публікації	Оцінюється комплексно в блоці Execution (глибина розуміння проблеми автором).	Ступінь самостійності роботи -10 балів, Наявність наукових публікацій -10 балів
Робота з літературою та оформлення	Оцінюється в межах презентації та огляду літератури.	Рівень використання джерел -5 балів, Якість оформлення -5 балів
Презентація та усна наукова дискусія	Poster Presentation 10 балів Oral Presentation – 25 балів Оцінюється разом із рецензією під час стендового/усного захисту.	Оцінюється окремо на II етапі (під час підсумкової науково-практичної конференції за рішенням рецензентів).

За результатами порівняння встановлено, що ув оцінювання конкурсу наукових робіт в Україні 30 балів зі 100 припадає на наявність публікацій та документально підтверджене впровадження результатів. Міжнародні критерії (ISEF) дають найбільшу вагу (60%) методології, дизайну експерименту та систематичності збору даних.

Студентські турніри. Студентські турніри – командне творче змагання студентів вищих навчальних закладів у вирішенні завдань проблемного характеру та їх захисті у наукових дискусіях.

Проведення студентських турнірів в Україні регламентується Наказом МОН №1150 від 27.09.2016 «Про затвердження Положення про студентські професійні творчі конкурси, турніри» *(Про затвердження Положення про студентські професійні творчі конкурси, турніри: Наказ Міністерства освіти і науки України від 27.09.2016 № 1150)*

Згідно з положенням основними завданнями конкурсів, турнірів є:

- сприяння формуванню в умовах євроінтеграції творчого покоління молодих науковців та практиків для різних галузей суспільного життя;
- популяризація досягнень науки, техніки та новітніх технологій;
- впровадження нових форм і методів пошуку, підтримки та заохочення обдарованої студентської молоді;
- формування команд для участі в міжнародних конкурсах, турнірах.

При умові, якщо в турнірі приймають участь більше 10% іноземних учасників, такому турніру надається статус міжнародного.

Турніри відрізняються за форматом проведення.

Наукові студентські турніри.

Приклади турнірів :

1. Всеукраїнський студентський турнір фізиків.

Цей турнір існує з 2001 року, а з 2009 року турнір в Україні є національним відбором до Міжнародного турніру фізиків (International Physicists' Competition). Інформаця про проведення турніру доступна на офіційному сайті *(Всеукраїнський фізичний турнір (IPT Ukraine) : офіційний сайт. URL: https://ukraine.iptnet.info/*).

Матеріали міжнародного турніру фізиків публікуються у відкритому доступі. За ідеєю редактора журнала Emergent Scientist, Daniel Suchet (*Suchet D.*

, *2017*) результати наполегливої праці студентів над підготовкою доповідей потрібно перетворювати на наукові публікації.

2. **Медичний турнір**.

І Всеукраїнський медичний турнір відбувся 5 листопада 2016 року на базі Національного медичного університету імені О.О. Богомольця , а у 2018 році турнір об'єднів учасників з Одеси, Києва, Вінниці, Сум .Львова та Харкова. З 2025 року в м.Києві Медичний турнір знову зібрав учасників трьох університетів , в який викладається освітня програма «Медицина». Київський національний університет імені Тараса Шевченко, Національний медичний університет імені О.О.Богомольця і ПВНЗ «Київський медичний університет»

Турніри мають схожий формат проведення і складається з 2 етапів.

1. Підготовчий: За 2–6 місяців до очного/онлайн фіналу оргкомітет турніру фізиків оприлюднює перелік із 10–17 складних дослідницьких завдань. Команди проводять розрахунки, моделювання та експерименти. Для медичного турніру оприлюднюються теми для підготовки і презентації.

2. Проведення турніру.

Команда зазвичай складається з 3–6 студентів та очолюється капітаном і науковим керівником. Під час турніру науковий керівник не приймає участь у відповідях команд.

Турнір проходить у вигляді рольової гри Перед початком бою проводиться жеребкування, під час якого визначається ролі команд, а також теми завдань для кожної команди. Протягом бою члени команди не можуть консультуватися з будь-ким, хто не є членом команди, всі суперечливі питання вирішуються ведучим (за погодженням Журі) тільки з капітанами команд.

Ролі та їх функції розподіляються таким чином:

Доповідач: представляє підготовлене командою вирішення одного з турнірних завдань у вигляді короткої ілюстрованої доповіді. Повнота правильність і обґрунтованість представленого рішення піддається критичній оцінці з боку учасника з команди-суперника, яка виконує роль Опонента.

Опонент: робить розгорнутий аналіз представленої доповіді: оцінює повноту, науковість і оригінальність рішення; висловлює критичні зауваження до форми доповіді; повинен вказати на позитивні моменти і обґрунтувати принципові недоліки, як у вирішенні завдання так і в самому виступі доповідача. Задає питання доповідачу спрямовані на з'ясування помилок у розумінні проблеми і запропонованому рішенні а також не більш докладне пояснення окремих положень і висновків доповіді

Рецензент дає коротку оцінку виступам Доповідача і Опонента; визначає наскільки повно вони справились зі своїми обов'язками; аналізує розуміння обговорюваної проблеми учасниками. Якщо Рецензент вважає, що Опонент не повністю впорався зі своїм завданням, він може доповнити його виступ. Задає питання Доповідачу і Опоненту, спрямовані на подальший розвиток полеміки між учасниками.

У наступному раунді команди міняються ролями і розігрують іншу задачу. Хід бою регулює ведучий, а всі дії учасників оцінює комісія з декількох членів журі. Команда, яка набрала найбільшу кількість балів в ході бою оголошується переможцем.

Журі: Оцінює наукову обґрунтованість, доказову базу та ведення наукової дискусії кожної сторони. До складу журі входять представники від кожного освітнього закладу, студенти якого беруть участь у турнірі. Кожен заклад може делегувати одного представника. Члени журі повинні бути незалежними та неупередженими у своїх оцінках. Журі використовує чітко визначені критерії оцінювання, які доводяться до відома учасників до початку турніру.

3.**Медичний турнір «BrainBoost Battle»** започаткований кафедрою пропедевтики педіатрії Одеського Національного медичного університету проходив передбачав три відбіркові тури по 10 запитань, у кожному з яких команди змагалися у швидкості, кмітливості та глибині знань. Запитання

вимагали не лише правильної відповіді, а й уміння мислити клінічно, знаходити неочікувані асоціації та працювати як єдиний механізм.

Студентські змагання із симуляційної медицини. Медичні студентські турніри та змагання із стимуляційної медицини зазвичай зосереджуються на клінічному мисленні, диференційній діагностиці, командній роботі та наданні екстреної медичної допомоги. За ретроспективною оцінкою Pajor M., та співавт *(Pajor M., Xie N., Podolej G., 2023)* змагання із стимуляційної медицини - це ефективний навчальний досвід, що підвищив компетентність учасників під час подальших ротацій в клінічних відділеннях. Такий різновид ігор може бути дуже корисним освітнім форматом для студентів-медиків, особливо якщо вони приділяють час підготовці до змагань і отримують структурований зворотний зв'язок щодо своїх дій.

Прикладами таких заходів є:

1.**SESAM SimUniversity (Simulation Competition).**

Європейське студентське змагання із симуляційної медицини, яке проводиться під егідою Європейського товариства симуляції в медицині (SESAM).

На думку засновників змагання такий формат заходу сприяє розвитку ключових компетенцій, необхідних для забезпечення безпеки пацієнтів, зокрема лідерських якостей, навичок комунікації в умовах браку часу, ситуаційної обізнаності та управління ресурсами в кризових ситуаціях. Структурований процес дебрифінгу під керівництвом експертів гарантує відповідність визнаним освітнім стандартам і дозволяє досягти максимальних результатів навчання. *(Sim University | Healthcare Simulation Training for Students / SESAM. URL: https://sesamsociety.org/sim-university/)*

В процесі змагання команди студентів-медиків працюють із високоточними роботами-симуляторами (*high-fidelity mannequins*) у реалістичних клінічних сценаріях (невідкладні стани, реанімація,

фармакотерапія), де оцінюється швидкість прийняття рішень, клінічні навички та комунікація в команді.

2 AIMS Clinical Competition.

Міжнародні студентські клінічні змагання в межах щорічного конгресу AIMS Meeting у Португалії, що проводиться за підтримки Hospital da Luz Learning Health. *(Clinical Competition / AIMS Meeting. URL: https://www.aimsmeeting.org/clinical-competition/).*

На змагання запрошуються команди з чотирьох осіб перевірити свої знання, вирішуючи клінічні кейси. Учасники починають із тестових завдань із вибором правильної відповіді, після чого переходять до етапів із використанням високореалістичних симуляцій; там ретельно оцінюються їхнє клінічне мислення, практичний підхід, уміння працювати в команді та здатність формулювати диференціальні діагнози.

3. SIMWars (Medical Student Simulation Competition).

Міжнародний формат інтерактивних симуляційних боїв, заснований за сприяння Emergency Medicine Residents' Association (EMRA). *(SimWars / EMRA. URL: https://www.emra.org/simwars.)*

Команди вирішують невідомі клінічні кейси в режимі реального часу перед глядачами та журі. Команди з чотирьох учасників змагаються між собою: вони мають 8 хвилин на відпрацювання сценарію, після чого викладачі оцінюють їхні навички комунікації, прийняття рішень та результати дій. Після кожного виступу експерти проводять дебрифінг, оцінюючи медичні протоколи, командну взаємодію та роботу в складних умовах.

4. MedCup – World Cup of Medicine.

З 2021 року MedCup є провідним європейським медичним змаганням для студентів, що поєднує практичні завдання, клінічні симуляції та конференції.

Детальну ынформацыю можно отримати на офіційний ресурсі. *(Experience / MedCup – World Cup of Medicine. URL: https://www.medcup.eu/#experience).* .

В Україні проводяться національні чемпіонати із симуляційної медицини та екстреної медичної допомоги (наприклад, під егідою Української асоціації симуляційної медицини). На так их змаганнях відпрацьовують алгоритми TCCC/BLS/ALS, зупинку кровотеч та серцево-легеневу реанімацію.

Важливою складовою успішного виступу на змаганнях є доступ до симуляційної лабораторії та ознайомлення із симуляційним манекеном. Іноді учасники не беруть до уваги відмінності між пластиковим муляжем і справжнім пацієнтом, тоді як для успіху в змаганнях критично важливо вміти відкинути умовність ситуації й повірити, що цей пластиковий манекен — справжня людина. Навіть такі прості речі, як звучання серця й легень або сила натискання під час перевірки пульсу, відрізняються у випадку з манекеном і живою людиною, тому для успішного виконання завдання в межах сценарію необхідна попередня практика. Викладачі медичних закладів зазвичай охоче підтримують інтерес студентів до невідкладної медицини. Dong, C та співавт.*(Dong C., Clapper T. C., Szyld D., 2013)* дослідили думки викладачів та лікарів-резидентів щодо того, чи може формат SimWars слугувати навчальним інструментом для резидентів спеціальності «Медицина невідкладних станів». За отриманими результатами завдяки змагальному характеру формат SimWars може бути ефективним засобом підготовки резидентів за умови проведення дебрифінгу з використанням чітко структурованих критеріїв оцінювання. Саме змагальний елемент спонукає учасників демонструвати найкращі результати. Резиденти розраховують застосовувати на практиці клінічні навички, вміння вести пацієнтів та навички командної роботи, відпрацьовані під час SimWars. Підготовка завдань і сценаріїв для таких змагань відіграє важливу роль у проведенні заходу. За аналітичним оглядом Flávia Cristina Zanchetta, та співавт *(F. C. Zanchetta et al., 2026)* успіх змагань підкреслив критичну роль сильної відданості та залученості команди, відповідальної за розробку сценаріїв, чия координація та підготовленість були важливими для забезпечення стандартизації, реалізму та освітньої узгодженості між станціями.

Брейн-ринг. Формат «Брейн-ринг» є популярним видом інтелектуальних змагань, який поєднує перевірку знань, швидкість реакції та командну взаємодію.

На відміну від наукових турнірів із тривалими доповідями та дискусіями, брейн-ринг проходить у динамічному форматі коротких раундів із часовим обмеженням на відповідь (зазвичай 20–60 секунд).

Приклади таких заходів:

1. **Медичний Брейн-ринг «Медицина без меж»** під час фестивалю «Медицина третього тисячоліття» на базі Харківського національного медичного університету.

Гра проходить у три етапи, які відрізняються за складністю: легкий, середній та складний, де учасники мають якнайшвидше дати правильну відповідь. Перший етап включає в себе цікаві тестові питання, другий – максимально точну відповідь на питання чи відеопитання, третій – розміщення фактів у певному порядку.

Питання включають клінічні симптоми, диференційну діагностику, видатні відкриття в медицині, фармакологічні загадки та фото-завдання.

2.**Юридичний Брейн-ринг** на базі юридичного факультетуЧернівецького національного університету імені Юрія Федьковича та захід «Я знаю закон і право» за ініціативою Луцького національного технічного університету

Змагання між проводяться мі командами юридичних факультетів та студентами ,які вивчають правознавство

Завдання включають розв'язання швидких правових колізій, знання конституційного, цивільного та кримінального права, історії права та судових прецедентів.

3.**Екологічний брейн-рінг** «EcoChallenge: Думай екологічно!» запропонований кафедрою біології та екології Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка.

Під час тематичних раундів учасники відповідали на запитання, присвячені сучасним екологічним проблемам, біорізноманіттю, зміні клімату, екологічній безпеці, охороні природи Хмельницької області та України.

4. **Brain-Ring в межах Педіатричного форуму** за підтримки United World Cultures Foundation.

У 2019 році в межах Педіатричного форуму відбувся інтелектуальний конкурс «Брейн-ринг» із педіатрії. У змаганні взяли участь сім команд, серед яких було визначено п'ятірку найкращих. *(Congratulations to the Medical Faculty No. 3, Pediatrics Department of BNMU, with an anniversary date / UWCF. Nov. 2019. URL: https://uwcfoundation.com/en/blagotvoritelnost-v-ukraine/v%D1%96ta%D1%94mo-medichnij-fakultet-%E2%84%963,-specz%D1%96aln%D1%96st-ped%D1%96atr%D1%96ya,-nmu-%D1%96m.-o.o.bogomolczya*)

5. **Nar Brain Ring quiz competition.**

Підтримка науки та освіти є одним із ключових напрямків стратегії корпоративної соціальної відповідальності Nar. Мобільний оператор багато років підтримує розвиток інтелектуальних проектів і вже 14 років є одним із основних прихильників Brain Ring. В такому брейн-рінгу приймають участь 14 регіонів та 10 університетів в Азербайджані. *(Nar supports the launch of the 28th season of Brain Ring / Nar. URL: https://www.nar.az/en/news/breyn-ringq-yeni-movsum/ .)*

Стандартна структура та регламент проведення брейн-рінгу:

1. Команди: 2 ігрові столи на сцені/майданчику, за якими сидять по 4–6 студентів з кожної команди.

2. Технічне оснащення: Блок-система (брейн-система) з кнопками та лампочками/звуковим сигналом для фіксації того, хто перший натиснув кнопку після команди «Час!».

3. Регламент раунду:

- Ведучий зачитує питання.
- Лунає сигнал «Час!», після якого вмикається відлік (наприклад, 30 чи 60 секунд).
- Команда, яка першою натискає кнопку, отримує право на відповідь.

- За правильну відповідь — 1 бал (або перехід права вибору теми). За неправильну — суперники отримують залишок часу на обмірковування та право дати свою відповідь.

4. Схема турніру:

- Груповий етап: Серії коротких боїв .
- Півфінали та Фінал : Бої до отримання переможця.

Узагальнена інформації про неформальні науково-освітні заходи наведена в табл.2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика інтелектуальних змагань студентів олімпіади, наукові турніри, брейн-ринги та конкурси наукових робіт.

Критерій порівняння	**Олімпіада**	**Науковий турнір**	**Брейн-рінг**	**Конкурс наукових робіт**
Основна мета	Перевірка глибоких теоретичних знань та швидкості розв'язання складних завдань	Пошук рішень складних відкритих проблем, розвиток наукової дискусії	Перевірка ерудиції, швидкої реакції та командної згуртованості	Презентація та захист власного наукового дослідження/проєкту
Формат участі	Переважно індивідуальний (іноді з командним заліком)	Командний (3–5 осіб)	Командний (6 осіб)	Індивідуальний або у співавторстві
Характер завдань	Задачі із чіткою правильною відповіддю (тести, розрахунки, кейси)	Відкриті дослідження/проблеми, що не мають єдиної відповіді	Короткі питання на логіку, ерудицію та асоціативне мислення	Завершене наукове дослідження (новація, експеримент, аналітика)
Тривалість та етапи	Одноденний або дводенний захід (письмовий/практичний тур)	Заздалегідь відомі завдання (1–2 місяці), потім кілька днів боїв	Динамічна гра (від кількох хвилин до кількох годин)	Тривалий процес (написання роботи протягом місяців + захист)
Ролі учасників	Учасник (виконує роботу самостійно)	Доповідач, Опонент, Рецензент (зміна ролей під час боїв)	Капітан, гравці команди	Автор / Дослідник (презентує та відстоює свої результати)

Продовження таблиці 1.

Ключові навички (Soft & Hard skills)	Академічні знання, аналітичне мислення, концентрація	Ораторське мистецтво, ведення наукової дискусії, критичне мислення, командна робота	Швидкість мислення, ерудиція, стресостійкість, оперативне прийняття рішень	Академічне письмо, методологія досліджень, публічний захист, самостійність
Формат оцінювання	Перевірка робіт журі за чіткими критеріями	Відкрите оцінювання членами журі після раунду виступів і дискусії	Нарахування балів за правильні відповіді на швидкість (сигнал кнопки)	Рецензування роботи + оцінка за публічну презентацію (доповідь та ілюстративний матеріал)

Завершальний етап студентських наукових заходів оцінювання та отримання результатів. За дослідженнями Ariel Mitev та співав *(Mitev A., Koloszár L., Wimmer Á. , 2025)* конструктивний текстовий зворотний зв'язок має більше значення, ніж отримана кількість балів. Учасники сприймають нижчий бал як справедливий, якщо текстова оцінка є детальною, ґрунтовною та підтримувальною, вказує на напрями для вдосконалення та має перспективний характер. Крім того, важливим є забезпечення можливості висловити власну думку та дотримання нейтральності журі; це гарантує, що студенти отримають справді позитивний досвід і продовжать працювати з новими силами незалежно від результатів конкурсу.

Висновки:

1. Неформальні науково-освітні заходи (олімпіади, конкурси наукових робіт, наукові турніри, симуляційні змагання, брейн-ринги та кейс-чемпіонати) є важливими чинниками реалізації студентсько-центричного та компетентнісного підходів у вищій школі.

2. Різноманітні формати інтелектуальних змагань дозволяють поглибити фундаментальні академічні знання, аналітичні навички, критичне мислення, ораторську майстерність.

3. Наукові турніри та конкурси наукових робіт розвивають методологічну грамотність, навички проведення самостійних досліджень, вміння ведення фахової дискусії

4. Симуляційні змагання,кейс-чемпіонати , брейн- ринги формують командну роботу, швидкість прийняття рішень, розвивають оперативне мислення.

5. Сучасний розвиток студентських змагань супроводжується активним впровадженням інструментів цифрового контролю (AI-прокторинг, Safe Exam Browser) для забезпечення академічної доброчесності, а також переходом від репродуктивних завдань до критичного аналізу первинних наукових публікацій (Research Olympiads).

6. Подолання психологічних бар'єрів (страх невдачі, брак компетенцій) можливо при наявній підтримці з боку викладачів та студентів , в рамках студентських наукових гуртків.

7. Надання якісного, конструктивного та перспективного текстового зворотного зв'язку від членів журі, який має вищу мотиваційну цінність, ніж просто бальна оцінка.

References:

Нємцев А. Гра як основа освіти: спадщина Джона Дьюї. *Молодь і ринок*. 2026. № 5 (249). С. 149–155. URL: https://doi.org/10.24919/2308-4634.2026.353411

Заєць С. В., Юдіна С. П. Організація інтелектуальних змагань студентів у закладах вищої освіти: форми проведення та напрями вдосконалення. *Статистика України*. 2020. № 2–3. С. 78–88. URL: [https://doi.org/10.31767/su.2-3(89-90)2020.02-03.09](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.31767/su.2-3(89-90)2020.02-03.09)

Molnár L., Hajdú N., Nagy S. Students' intention to participate in scientific competitions–The scientific students' associations conference in Hungary. *Heliyon*. 2026. Vol. 12, no. 15. Art. e45433. URL: [https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2026.e45433](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2026.e45433)

Студентська олімпіада як інтерактивна методика підвищення якості підготовки студентів на кафедрі гістології, цитології та ембріології / В. Шепітько та ін. *Актуальні проблеми сучасної медицини: Вісник Української медичної стоматологічної академії*. 2023. Т. 23, № 1. С. 163–165. URL: https://doi.org/10.31718/2077-1096.23.1.163

Про затвердження Положення про проведення Всеукраїнської студентської олімпіади : Наказ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України від 13.12.2012 № 1410. URL:[https://surl.li/dtehvh] (https://surl.li/clnylm)(дата звернення: 02.10.2026).
Luo Z., Dickey E. Evaluating Performance Consistency in Competitive Programming: Educational Implications and Contest Design Insights. *arXiv preprint arXiv:2505.04143*. 2025. URL:
https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.04143
McGill healthcare-management case competition: an educational innovation addressing critical healthcare issues in operations management / S. Razzaq et al. *Canadian Journal of Emergency Medicine*. 2025. Vol. 27, no. 11. P. 867–871. URL: [https://doi.org/10.1007/s43678-025-00987-2](https://surli.cc/rmmrnp)
Can T., Farrell R., Lim C. Y. Comparing Two Major Programming Contests: IOI vs. ICPC. *The Journal of Competitive Learning*. 2026. Vol. 2, no. 1. URL: https://doi.org/10.66044/4g3c2e49
THINQ Tank: An Interprofessional Healthcare Quality Improvement Case Competition for Undergraduate Students / C. Chen et al. *Journal of Interprofessional Education & Practice*. 2026. Art. 100805. URL: https://doi.org/10.1016/j.xjep.2026.100805
International Mathematics Competition for University Students : official website. URL: https://www.imc-math.org.uk/ (date of access: 07.10.2026).
Ortwein H., Heußner S. Formula Student – A successful part of engineering education. *16. Internationales Stuttgarter Symposium* : Proceedings / ed. by M. Bargende, H. C. Reuss, J. Wiedemann. Wiesbaden : Springer, 2016. P. 605–616. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-13255-2_46
An Inter-University Virtual Geriatric Case Competition to Build Interprofessional Collaboration Skills / K. Talley et al. *Innovation in Aging*. 2021. Vol. 5, suppl. 1. P. 758.DOI:https://doi.org/10.1093/geroni/igab046.2809
Sevalho I. C., Ramchandani M., dos Santos N. V. G. Helper in Olympics: Aplicativo móvel para incentivar e ajudar estudantes a participarem de olimpíadas científicas. *Congresso Brasileiro de Informática na Educação (CBIE)*. SBC, 2025. P. 176–179.
International Collegiate Programming Contest : official website. URL: https://icpc.global (date of access: 08.10.2026).
FAQ online proctoring. Erasmus University Rotterdam : official website. URL: https://surl.li/zgcawb (date of access: 08.10.2026).
News. Safe Exam Browser : official website. URL: https://surl.li/hxrvzo (date of access: 08.10.2026).
GazeRecorder - Eye Tracking Software : official website. URL: https://gazerecorder.com (date of access: 08.10.2026).
About IRO. International Research Olympiad : official website. URL: https://surl.li/orgyjz (date of access: 08.10.2026).
Про затвердження Положення про Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей : Наказ Міністерства освіти і науки України від 18.04.2017 № 605. URL: [https://surl.li/kydwhw](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0620-17#Text) (дата звернення: 02.10.2026).
International Student Competition "Black Sea Science 2026". Odesa National Task Force University : official website. URL: http://isc.ontu.edu.ua/2026-2/?lang=en (date of access: 08.10.2026).
Global Undergraduate Awards : official website. URL: https://undergraduateawards.com/ (date of access: 08.10.2026).
Grand Award Judging Criteria. Society for Science : official website. URL: https://surl.li/qzkkbf (date of access: 08.10.2026).

Contests for Students. IEEE Students : official website. URL: https://surl.lt/nbkjfc (date of access: 08.10.2026).
Young Talents. EBM : official website. URL: https://my.ebm.one/young-talents (date of access: 08.10.2026).
CIOMS establishes annual award for medical students. Council for International Organizations of Medical Sciences (CIOMS) : official website. URL: https://surl.li/jtgejg (date of access: 08.10.2026).
APA / Continuity Research Network (CORNET) Young Investigator Awards Program. Academic Pediatric Association : official website. URL: https://surl.lt/gkwyni (date of access: 08.10.2026).
Conference. International Journal of Medical Students (IJMS) : official website. URL: https://ijms.info/IJMS/Conference/welcome (date of access: 08.10.2026).
Про затвердження Положення про студентські професійні творчі конкурси, турніри: Наказ Міністерства освіти і науки України від 27.09.2016 № 1150. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1358-16#Text (дата звернення: 02.10.2026).
Всеукраїнський фізичний турнір (IPT Ukraine) : офіційний сайт. URL: https://ukraine.iptnet.info/ (дата звернення: 08.10.2026).
Suchet D. International Physicists' Tournament 2016: the origins of EmSci. *Emergent Scientist*. 2017. Vol. 1. Art. 8. URL: [https://doi.org/10.1051/emsci/2017008](https://doi.org/10.1051/emsci/2017008
Pajor M., Xie N., Podolej G. Medical student education simulation competitions. *The Clinical Teacher*. 2023. Vol. 20, no. 1. Art. e13547. URL: https://doi.org/10.1111/tct.13547
Sim University | Healthcare Simulation Training for Students / SESAM. URL: https://sesamsociety.org/sim-university/ (дата звернення: 08.10.2026).
Clinical Competition / AIMS Meeting. URL: https://surl.li/trovui (дата звернення: 08.10.2026).
SimWars / EMRA. URL: https://www.emra.org/simwars (дата звернення: 08.10.2026).
Experience / MedCup – World Cup of Medicine. URL: https://www.medcup.eu/#experience (дата звернення: 08.10.2026).
Dong C., Clapper T. C., Szyld D. A qualitative descriptive study of SimWars as a meaningful instructional tool. *International Journal of Medical Education*. 2013. Vol. 4. P. 139–147. URL: [https://doi.org/10.5116/ijme.51d0.7652](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.5116/ijme.51d0.7652)
Congratulations to the Medical Faculty No. 3, Pediatrics Department of BNMU, with an anniversary date / UWCF. Nov. 2019. URL: https://surl.li/vlytnj (дата звернення: 08.10.2026).
Into the sim arena: Competing to learn, learning to compete—An experience report on the first Brazilian simulation competition / F. C. Zanchetta et al. *Clinical Simulation in Nursing*. 2026. Vol. 114. Art. 101951. URL: https://doi.org/10.1016/j.ecns.2026.101951
Nar supports the launch of the 28th season of Brain Ring / Nar. URL: https://surl.li/okpouf (дата звернення: 08.10.2026).
Mitev A., Koloszár L., Wimmer Á. A model of constructive procedural justice through the example of a student academic competition. *The International Journal of Management Education*. 2025. Vol. 23, no. 2. Art. 101176. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijme.2025.101176

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-152
UDC 377:004.65:02

CHAPTER 5.
DESIGNING DIGITAL INFORMATION RESOURCES FOR VOCATIONAL EDUCATION INSTITUTIONS BASED ON THE «LIBRARY» DATABASE

Iryna DANYLYUK
PhD in Economics
West Ukrainian National University, Department of Economic Cybernetics and Digital Technologies,
(11, Lvivska Street, Ternopil, 46009, Ukraine)
irynadanylyuk9@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-5090-0926

Abstract. This study addresses both theoretical and practical aspects of designing digital information resources for vocational education institutions, with a focus on the “Library” database. The necessity of digitalizing library and information processes is substantiated as an integral component of developing a modern educational environment and enhancing the quality of information support for participants in the educational process. The organization of data concerning library collections, authors, publications, and users is analyzed, and functional requirements for the digital information resource are defined. Principles of relational database design, the structure of interconnected entities, and mechanisms for ensuring data integrity are examined. The paper outlines an approach to the development of a web-oriented information resource utilizing modern software tools that provide convenient access to bibliographic information and facilitate user interaction with the system. Particular attention is devoted to the implementation of search, browsing, and display functionalities for books and authors, as well as to the improvement of the user interface. The practical significance of the proposed solution is highlighted in terms of automating library processes, increasing the accessibility of information resources, and fostering the formation of a contemporary digital environment within vocational education institutions. The proposed approach can be adapted to the needs of other educational institutions and employed as a foundation for further expansion of the functionality of digital library systems. The suggested database structure and principles of web resource organization may be tailored to the specific characteristics of individual institutions and serve as a basis for creating or modernizing their digital information infrastructure.

Keywords: digital solutions, information systems, electronic databases, software frameworks, system logic, search mechanisms.

ПРОЄКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ ЗАКЛАДУ ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ НА ОСНОВІ БАЗИ ДАНИХ «БІБЛІОТЕКА»

Анотація. У дослідженні розглянуто теоретичні та практичні аспекти проєктування цифрових інформаційних ресурсів закладу професійної освіти на основі бази даних «Бібліотека». Обґрунтовано необхідність цифровізації бібліотечно-інформаційних процесів як складової розвитку сучасного освітнього середовища та підвищення якості інформаційного забезпечення учасників освітнього процесу. Проаналізовано особливості організації даних про бібліотечний фонд, авторів, видання та користувачів, визначено функціональні вимоги до цифрового інформаційного ресурсу. Розглянуто принципи проєктування реляційної бази даних, структуру взаємопов'язаних сутностей і механізми забезпечення цілісності даних. Описано підхід до розробленого веборієнтованого інформаційного ресурсу з використанням сучасних програмних засобів, що забезпечують зручний доступ до бібліографічної інформації та взаємодію користувача із системою. Особливу увагу приділено реалізації пошуку, перегляду й відображення інформації про книги та авторів, а також удосконаленню користувацького інтерфейсу. Визначено практичне значення запропонованого рішення для автоматизації бібліотечних процесів, підвищення доступності інформаційних ресурсів та формування сучасного цифрового середовища закладу професійної освіти. Запропонований підхід може бути адаптований до потреб інших освітніх установ і використаний як основа для подальшого розширення функціональності цифрових бібліотечних систем. Запропонована структура бази даних і принципи організації вебресурсу можуть бути адаптовані до особливостей конкретного освітнього закладу та використані як основа для створення або модернізації його цифрової інформаційної інфраструктури.

Ключові слова: цифрові рішення, інформаційні системи, електронна база даних, програмні фреймворки, логіка, пошуковий механізм.

Вступ. Технологічний розвиток у XXI столітті активно впливає на всі сфери суспільної діяльності, поступово змінюючи традиційні підходи до організації робочих процесів та управління інформацією. Цифрові рішення стають ключовим інструментом модернізації, забезпечуючи ефективність, мобільність та інтеграцію різноманітних сервісів у єдине різноманітне середовище. Однією з галузей, що зазнає суттєвих трансформацій, є бібліотечна справа, яка переходить від класичних форм обліку і документування до використання сучасних інформаційних систем і електронних баз даних.

У професійні діяльності бібліотечних працівників значне місце займають такі процеси, як реєстрація нових надходжень, облік видачі літератури, контроль її повернення, ведення статистики та формування звітності. Виконання зазначених операцій у традиційній формі потребує значних витрат часу й трудових ресурсів, а також підвищує ймовірність виникнення помилок, дублювання або втрати інформації. Саме тому впровадження електронних баз даних та інформаційних систем є необхідною умовою оптимізації бібліотечних процесів, підвищення точності обліку та забезпечення ефективності управління ресурсами.

Сучасні веб технології створюють широкі можливості для розробки зручних та інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів, адаптованих до потреб різних категорій користувачів. Використання програмних фреймворків і бібліотек дозволяє скоротити час розроблення інформаційних систем, скоротити процес їхнього супроводу та підвищити надійність функціонування. Водночас реалізація веб доступу забезпечує можливість роботи із системою з різних типів пристроїв, незалежно від місця перебування користувача, що відповідає сучасним вимогам цифрового освітнього та професійного середовища.

Особливу актуальність цифровізація бібліотечних процесів набуває у сфері професійної освіти. Заклади цього типу потребують швидкого доступу до навчальної та наукової літератури, ефективної системи пошуку й навігації, а також можливості інтеграції бібліотечних ресурсів у загальну інформаційну інфраструктуру освітнього середовища. Студенти та викладачі очікують від бібліотек не лише збереження фондів, а й створення умов для оперативного отримання необхідних матеріалів, незалежно від формату чи місця доступу.

Аналіз сучасних тенденцій свідчить, що бібліотеки поступово переходять від автоматизації окремих операцій до формування комплексних інформаційних систем, які поєднують засоби управління фондами, електронної каталогізації, пошуку та представлення інформаційних ресурсів. Такі системи виконують не лише функцію збереження даних, а й стають інструментом

інтеграції освітніх і наукових процесів. У цьому контексті електронний каталог доцільно розглядати як складову комплексної інформаційної інфраструктури бібліотеки, що забезпечує структуроване зберігання бібліографічних даних, цілісність взаємопов'язаних об'єктів та ефективний пошук інформації.

Важливим аспектом є також розвиток користувацького інтерфейсу, який має відповідати сучасним стандартам зручності, доступності та інтерактивності. Недоліки багатьох існуючих систем – застарілий дизайн, відсутність адаптації до мобільних пристроїв, обмежені можливості персоналізації – знижують ефективність їх використання. Тому створення нових рішень повинно врахувати потреби різних категорій користувачів, забезпечувати інтуїтивну навігацію, швидкий доступ до даних та інтеграцію мультимедійних елементів.

Таким чином, розроблення веб орієнтованої каталожної системи «Бібліотека» є актуальним завданням цифрової трансформації професійної освіти. Вона має забезпечити ефективний облік і представлення бібліотечного фонду, оперативний пошук видань за визначеними критеріями, доступ до інформації про авторів та зручну навігацію для різних категорій користувачів. Запропонований підхід сприятиме не лише оптимізації бібліотечних процесів, а й формуванню сучасного цифрового освітнього середовища, що відповідає вимогам інформаційного суспільства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері цифровізації бібліотечної діяльності засвідчують поступовий перехід від автоматизації окремих бібліотечних операцій до формування комплексних інформаційних систем, які поєднують засоби управління фондами, електронної каталогізації, пошуку та представлення інформаційних ресурсів. Федорук О. та Зубарева М. розглядають автоматизацію бібліотечних процесів як комплекс взаємопов'язаних напрямів, що охоплюють електронну каталогізацію, облік і збереження фондів, управління електронними ресурсами та організацію дистанційного доступу до інформації *(Федорук О., Зубарєва М., 2026).*

Наливайко О.О. акцентує увагу на необхідності модернізації систем каталогізації, обліку бібліотечних фондів та розвитку автоматизованих бібліотечних інформаційно-пошукових систем, визначаючи їх як один із пріоритетних напрямів цифрової трансформації бібліотек *(Наливайко, О. О., 2025).* Таким чином, сучасний електронний каталог доцільно розглядати як складову комплексної інформаційної інфраструктури бібліотеки, а не лише як засіб зберігання бібліографічних записів.

Важливе місце у сучасних дослідженнях посідає питання розвитку бібліотечних сервісних платформ та архітектури цифрових бібліотек. У систематичному огляді досліджень бібліотечних сервісних платформ виокремлюють управлінські і сервісні функції таких систем, а також звертають увагу на проблеми їх упровадження, пов'язані зі значними обсягами даних, кадровими та ресурсними обмеженнями *(Somipam R. Shimray, A. Subaveerapandiyan, Naved Ahmad., 2025)*. Bernasconi E, Ceriani M. Mecella M. та Catarci T. на прикладі системи ARCA демонструють можливість поєднання проєктування програмного рішення, семантичного збагачення даних, пошуку та користувацького оцінювання цифрової бібліотеки *(Eleonora Bernasconi, Miguel Ceriani, Massimo Mecella ma Tiziana Catarci., 2023).* Зазначені підходи підтверджують доцільність комплексного проєктування інформаційної системи, у який структура бази даних, програмна логіка, пошукові механізми та користувацький інтерфейс функціонують як взаємопов'язані компоненти.

Аналіз сучасних досліджень свідчить про комплексний характер розвитку електронних каталогів, що охоплює цифровізацію бібліотечних процесів, удосконалення структури даних і метаданих, розвиток пошукових механізмів, інформаційної архітектури та користувацького інтерфейсу. Водночас значна частина досліджень зосереджена на масштабних бібліотечних платформах, семантичному збагаченні та інтеграції цифрових ресурсів. Це зумовлює актуальність розроблення компактних спеціалізованих інформаційних систем електронних каталогів, у яких забезпечується

структуроване зберігання бібліографічних даних, цілісність взаємопов'язаних об'єктів, ефективний пошук та зручне представлення інформації користувачеві.

Метою дослідження є обґрунтування та розроблення веборієнтованої електронної каталожної системи «Бібліотека» як інструменту цифровізації інформаційних процесів у професійній освіті, що забезпечує ефективний облік і представлення бібліотечного фонду, оперативний пошук видань за визначеними критеріями, доступ до інформації про авторів та зручну навігацію для різних категорій користувачів.

Результати обговорення. Стрімке зростання обсягів інформації в різних сферах суспільної діяльності зумовлює необхідність удосконалення підходів до її зберігання, систематизації та опрацювання. Бібліотечна діяльність також потребує застосування сучасних цифрових інструментів.

Для бібліотек різних типів і напрямів одним з пріоритетних завдань цифрової трансформації є перехід від традиційних каталогів до електронних інформаційних систем. Важливу роль у цьому процесі відіграють реляційні бази даних, які забезпечують структуроване зберігання інформації та можливість формування різноманітних пошукових запитів. Користувачі можуть здійснювати пошук літератури за автором, назвою, тематикою, роком видання та іншими характеристиками, а також застосовувати комбінації фільтрів для уточнення результатів. Такий підхід значно поширює функціональні можливості бібліотечного обслуговування та сприяє підвищенню ефективності використання інформаційних ресурсів.

Впровадження електронних систем управління не лише оптимізує основні бібліотечні процеси, а й відкриває нові можливості для проведення аналітичної роботи. Накопичені та структуровані дані дають змогу оперативно формувати статистичні показники, аналізувати використання бібліотечного фонду, визначати читацькі запити та оцінювати ефективність роботи бібліотеки.

Створення окремого електронного каталогу «Бібліотека» є доцільним з огляду на його здатність підвищити ефективність організації та використання бібліотечних ресурсів. Автоматизація типових операцій дає змогу зменшити навантаження на працівників і вивільнити час для виконання професійних завдань, зокрема консультування користувачів, інформаційного супроводу та роботу з бібліотечними ресурсами. Автоматизоване введення, зберігання й опрацювання інформації сприяє зменшенню кількості помилок та підвищенню достовірності даних. Використання електронного каталогу також забезпечує значно швидкий поступ необхідних видань порівняно з традиційними способами, що особливо актуально для бібліотек із великими обсягами фондів. Веборієнтований доступ до системи, своєю чергою, забезпечує користувачам можливість отримувати необхідну інформацію незалежно від місця перебування та типу пристрою, що відповідає сучасним вимогам цифрового освітнього середовища.

Для визначення функціональних характеристик та обґрунтування архітектури майбутньої системи доцільно здійснити аналіз наявних електронних бібліотечних каталогів. Дослідження сучасних програмних рішень дає змогу оцінити їхні функціональні можливості, переваги та обмеження, а також сформувати основні вимоги до розроблення власної системи. У межах проведеного дослідження розглянуто три електронні бібліотечні системи.

Для аналізу було обрано електронні каталоги провідних бібліотек України: Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського, наукова бібліотека імені Михайла Максимовича КНУ імені Тараса Шевченка та бібліотеки Національного авіаційного університету, інтерфейс яких відображено рисунками 1, 2, 3.

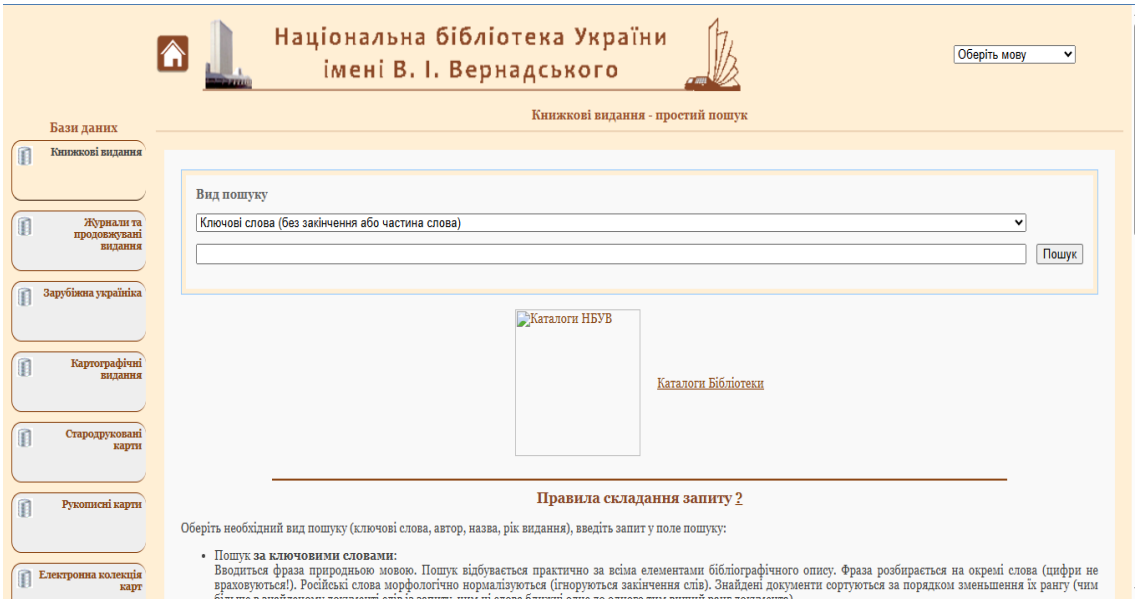

Рис. 1. Інтерфейс електронного каталогу Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського

Електронний каталог Національної бібліотеки України є одним з найбільших інформаційних ресурсів бібліотечного спрямування в Україні та забезпечує користувачам доступ до бібліографічних відомостей про документи, що входять до фондів бібліотеки. Система передбачає можливість пошуку інформації за основними параметрами, зокрема: ключовими словами, прізвищем автора, назвою документа та роком його видання. Для зручності користувачів каталог організовано відповідно до видів документів, серед яких книжкові та періодичні видання, картографічні матеріали, стародрукі, рукописні документи, нотні видання та інші типи бібліотечних ресурсів.

Інтерфейс системи побудовано на основі стандартної пошукової форми, у який користувач може обрати відповідний тип запиту та ввести необхідні параметри пошуку. Результати опрацювання запиту відображаються у формі переліку бібліографічних записів із ключовими відомостями про кожен документ. Для полегшення роботи із системою передбачені інформаційні матеріали та інструкції, що пояснюють принципи формування пошукових запитів і використання основних функцій каталогу.

Серед основних недоліків системи можна виокремити морально застарілий дизайн інтерфейсу, недостатню адаптованість до використання на мобільних пристроях та обмежені можливості інтерактивної взаємодії з користувачем. Функціонал каталогу не передбачає застосування динамічних фільтрів, візуального представлення обкладинок видань і формування рекомендацій на основі користувацьких запитів або оцінених видань. Навігація переважно здійснюється за традиційним принципом, а відсутність асинхронного завантаження даних може знижувати зручність і швидкість роботи користувача із системою.

Електронний каталог Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського забезпечує виконання основного завдання – надання користувачам бібліографічної інформації. Водночас його візуальні та функціональні характеристики не повною мірою відповідають сучасним вимогам до зручності, доступності, дизайну веб інтерфейсів. Це зумовлює доцільність розроблення сучасних цифрових рішень, які б поєднували надійність бібліотечних інформаційних систем із сучасними веб технологіями та орієнтацію на потреби користувачів.

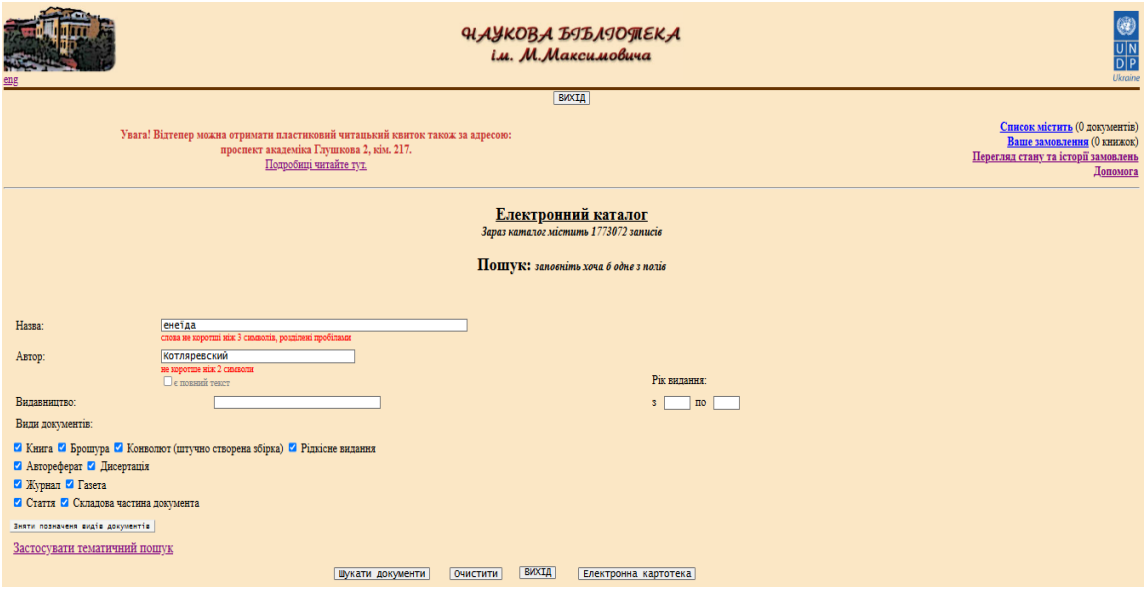

Рис. 2 Електронний каталог Наукової бібліотеки імені Михайла Максимовича КНУ імені Тараса Шевченка

Електронний каталог бібліотеки КНУ є важливим університетським інформаційним ресурсом, що забезпечує доступ до значного масиву бібліографічних даних, близько 1,7 мільйона записів. Його фонд охоплює широкий спектр документів, зокрема книги, брошури, періодичні видання, наукові публікації, дисертаційні дослідження та інші інформаційні матеріали, що використовуються для забезпечення освітньої та науково-дослідної діяльності університету.

Система забезпечує розширені можливості пошуку інформації за такими параметрами, як назва видання, автор, рік публікації, видавництво та тип документа. Для зручності користувачів передбачено тематичну навігацію та засоби фільтрації, які дають змогу структурувати і уточнювати результати пошуку. Зареєстровані користувачі можуть використовувати функціонал особистого кабінету, у якому доступна інформація про історію замовлень і раніше переглянуті матеріали. Такий підхід підвищує зручність роботи із системою та є особливо корисним для користувачів, які регулярно звертаються до бібліотечних ресурсів.

Водночас інтерфейс системи має низку технічних і функціональних обмежень. Веб дизайн вирізняється мінімалістичним оформленням і практично не використовує сучасні візуальні та інтерактивні елементи, що може впливати на зручність взаємодії з ресурсом. Недостатня адаптивність інтерфейсу до різних розмірів екранів ускладнює користування системою на мобільних пристроях. Пошукова форма містить значну кількість параметрів, що може створювати труднощі для користувачів, які не мають достатнього досвіду роботи з бібліотечними каталогами. Крім того, система не забезпечує візуального перегляду обкладинок видань та безпосереднього доступу до їхніх електронних версій, що знижує зручність отримання необхідної інформації.

Електронний каталог Бібліотеки імені Михайла Максимовича забезпечує основні інформаційні потреби академічної спільноти, надаючи студентам і науковцям доступ до необхідних бібліотечних ресурсів. Однак,

аналіз функціональних та інтерфейсних характеристик системи свідчить про доцільність її подальшого вдосконалення. Зокрема, актуальним вважаємо оновлення дизайну, підвищення зручності навігації та покращення користувацького досвіду відповідно до сучасних вимог і стандартів веб технологій.

Електронний каталог Науково-технічної бібліотеки Національного авіаційного університету представлено на рисунку 3.

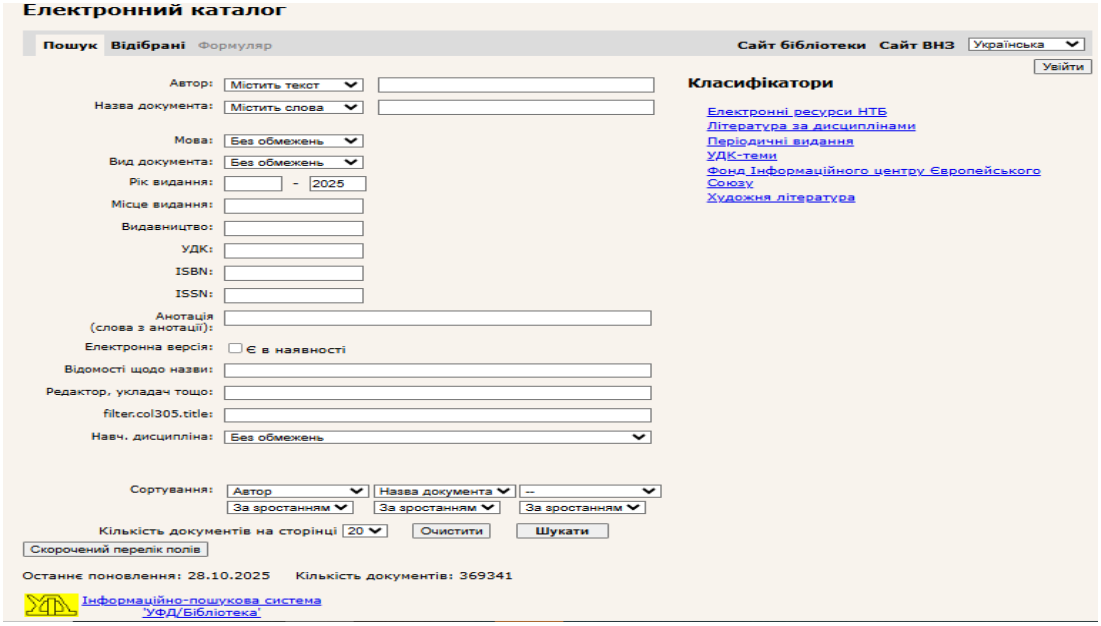

Рисунок 3. Електронний каталог НТБ НАУ

Він містить понад 360 тисяч бібліографічних записів, що охоплюють книги, періодичні видання, дисертації, кваліфікаційні роботи та інші види документів. Система орієнтована переважно на потреби студентів і викладачів технічних спеціальностей та спрямована на забезпечення освітнього процесу необхідними науковими й навчальними інформаційними ресурсами.

Пошуковий інструментарій системи характеризується широким набором параметрів, що дає змогу детально уточнювати запити. Користувачі можуть здійснювати пошуки за автором, назвою документа, мовою, видом видання, роком публікації, видавництвом та відповідною навчальною дисципліною. Додатково передбачено використання бібліографічних

ідентифікаторів, зокрема UDK, ISBN, ISSN, а також можливість фільтрації результатів за наявності електронної версії документа. Система підтримує тематичний пошук і роботу з анотаціями, що дає змогу розширити та конкретизувати результати відповідно до інформаційного запиту користувача. Окремий розділ «Класифікатор» забезпечує швидкий доступ до електронних ресурсів, навчальної літератури за дисциплінами та періодичних видань, сприяючи зручніший навігації в інформаційному просторі каталогу.

Інтерфейс системи зберігає традиційний підхід до організації веб ресурсів, у якому переважають текстові елементи та насичене фонове оформлення. Значну частину екрану займає пошукова форма, що містить велику кількість полів і параметрів, надмірних для виконання простих пошукових запитів. Система не передбачає візуального відображення обкладинок видань і не має належної адаптації для використання на смартфонах та планшетах. У дизайні практично відсутні сучасні елементи взаємодії з користувачем, зокрема автозаповнення полів, інтерактивні повідомлення та чітко виражена візуальна ієрархія інформації. Попри зазначені обмеження, до переваг системи можна віднести стабільність роботи та логічну структурованість інформації за типами документів, що є важливим під час опрацювання важливих обсягів бібліографічних даних, зокрема технічної й навчальної літератури.

За результатами аналізу функціонування наявних бібліотечних систем та визначення основних недоліків сформовано комплекс вимог до розробленого електронного каталогу «Бібліотека». Зазначені вимоги охоплюють функціональні характеристики системи, принципи організації та особливості користувацького інтерфейсу, а також технічні параметри її реалізації та впровадження. Чітке й обґрунтоване визначення вимог на початкових етапах розроблення є важливою умовою створення ефективної інформаційної системи, орієнтованої на потреби користувачів. Реалізація сформованих вимог має забезпечити підвищення зручності роботи з електронним каталогом,

оптимізації пошуку та опрацювання бібліографічної інформації, а також автоматизацію основних бібліотечних процесів.

Система електронного каталогу «Бібліотека» повинна реалізовувати комплекс функціональних можливостей, необхідних для ефективного пошуку, зберігання та опрацювання бібліографічної інформації. На рисунку 4 відобразимо основні функціональні вимоги до системи.

Для адміністративного персоналу в системі передбачено спеціалізовану панель керування, яка забезпечує виконання операцій з управління та актуалізації вмісту електронного каталогу. Реалізація розмежування прав доступу передбачає надання певних повноважень виключно авторизованим користувачам, які мають можливість додавати, редагувати та видаляти дані в інформаційній базі. Для звичайних користувачів функціональні можливості обмежуються переглядом доступної інформації та виконанням пошукових запитів, що забезпечує цілісність і захищеність даних каталогу.

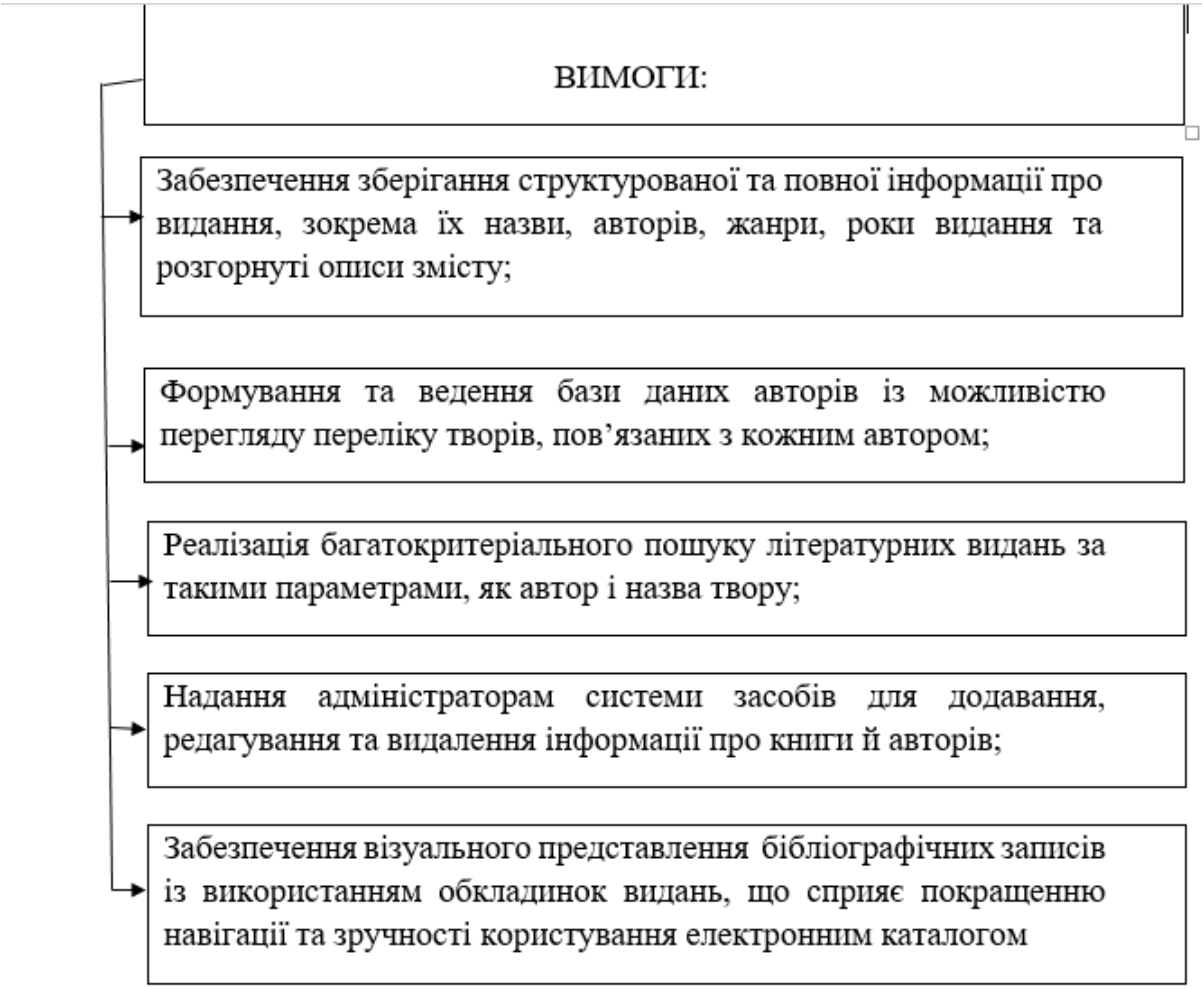

Рисунок 4. Основні функціональні вимоги до системи

Електронний каталог має відповідати не лише функціональним вимогам, а й забезпечувати належний рівень зручності та ефективності взаємодії користувача із системою. Користувацький інтерфейс повинен характеризуватися інтуїтивністю, логічністю та доступністю для осіб з різним рівнем цифрової та технічної підготовки. Важливим аспектом є забезпечення простого й зрозумілого виконання основних операцій, зокрема навігації, пошуку та перегляду бібліографічної інформації.

До організації користувацького інтерфейсу також формуємо основні вимоги, зокрема:

- використання сучасного візуального дизайну на основі фреймворку Bootstrap, що сприяє формуванню естетично привабливого, професійного та узгодженого оформлення веб системи;

- забезпечення логічної структури та зрозумілої навігації між основними розділами електронного каталогу;

- реалізація мінімалістичної та функціонально орієнтованої форми пошуку, яка містить лише необхідні елементи та не перевантажує користувацький інтерфейс.

Створення електронного каталогу бібліотеки є складним і багатоетапним процесом, що потребує системного планування цілей, завдань та етапів його розроблення. Чітке визначення цілей і завдань на початковому етапі формує загальний напрям проєкту забезпечує послідовність виконання запланованих дій та сприяє відповідності результатів установленим вимогам.

Метою дослідження є розроблення електронного каталогу бібліотеки як веб-інформаційного ресурсу, призначеного для спрощення та підвищення ефективності пошуку відомостей про бібліотечний фонд. Розроблений веб сайт має забезпечувати користувачам можливість оперативно знаходити і переглядати інформацію про книги та їх авторів із використанням мобільних пристроїв різних типів і платформ.

Досягнення поставлених цілей передбачає реалізацію комплексу взаємопов’язаних етапів, зокрема проєктування, розроблення, тестування та впровадження системи. Основними завданнями веб сайту є створення зручного інструменту для пошуку та перегляду бібліографічної інформації, формування електронної бібліотеки відповідно до визначеної колекції, а також забезпечення оперативного впровадження необхідного функціоналу та реалізації передбачених системою можливостей.

Визначаємося з архітектурою веб сайту, яка забезпечуватиме логічну організацію його компонентів і зручну взаємодію користувачів із системою.

Продумана структура є важливою передумовою ефективного функціонування електронного каталогу та швидкого доступу до необхідної інформації.

Структура веб сайту визначається як сукупність його сторінок, розділів і функціональних елементів, а також взаємозв'язків між ними. Раціонально організована структура забезпечує логічну навігацію, зрозумілу послідовність переходів і оперативний доступ користувачів до необхідної інформації. Чітка концептуальна модель сайту сприяє зручності роботи з ресурсом, зменшує складність взаємодії з системою та забезпечує ефективне представлення й опрацювання інформаційних ресурсів.

Проєктування системи здійснюється на основі комплексного аналізу цільової аудиторії, функціональних і бізнес-вимог, а також типу та структури інформації, яка буде представлена в електронному каталозі. На цьому етапі визначаються основні категорії користувачів, їхні інформаційні потреби та характер взаємодії із системою. Особлива увага приділяється організації бібліографічних даних, що дає змогу забезпечити їх логічне структурування та зручне представлення. Архітектура каталогу має передбачити розширені можливості пошуку і фільтрації документів за різними критеріями. Такий підхід забезпечує знаходження необхідної інформації та підвищує загальну зручність використання електронного ресурсу.

Використання різних підходів до організації структури сайтів залежно від його функціонального призначення та характеру інформації, що на ньому представлена передбачає веб-розробка. Одним з таких підходів є послідовна (лінійна) структура, за якою сторінки розташовуються в певному порядку, а користувач переходить від одного інформаційного блоку до іншого, відповідно до заданої послідовності. Такий тип структури доцільно застосовувати до навчальних курсів, презентацій, покрокових інструкцій або реєстраційних процедур, де важливим є послідовне проходження визначених етапів. Водночас для електронних каталогів і великих наборів даних лінійна організація є менш

ефективною, оскільки обмежує можливість довільного переміщення між інформаційними блоками та ускладнює швидкий доступ до потрібних записів.

Ієрархічна структура передбачає організацію контенту у вигляді системи розділів і підрозділів, які логічно пов'язані з головною сторінкою та розподілені за рівнями. Такий підхід доволі розповсюджений в інформаційних системах, оскільки дає змогу впорядковувати значні обсяги інформації та забезпечує послідовне представлення останньої. Для електронного бібліотечного каталогу ієрархічна модель може передбачати перехід від загальної інформації про бібліотечний фонд або окремі категорії видань до детального опису конкретної книги чи публікації.

Ефективна архітектура каталогу повинна передбачати не лише ієрархічну організацію, а й розвинену систему взаємних зв'язків між сторінками, що дає користувачеві можливість вільно переходити між пов'язаними інформаційними об'єктами, наприклад від опису книги до відомостей про її автора, тематичної категорії або інших видань. Поєднання ієрархічної структури з елементами взаємопов'язаної навігації дає змогу досягти оптимального балансу між чіткою організацією інформації, зручністю навігації та гнучкістю роботи користувача із системою.

Система навігації визначає принципи переміщення користувача між сторінками та функціональними рівнями веб сайту. Її основним завданням є забезпечення швидкого і зрозумілого доступу до необхідної інформації та мінімізація кількості переходів, необхідних для досягнення потрібного інформаційного об'єкта. Ефективно налаштована навігація має бути логічною, послідовною та передбачуваною для користувача.

Важливим елементом є глобальна навігація, яка забезпечує доступ до основних розділів сайту з будь-якої його сторінки. Зазвичай вона реалізується у вигляді верхнього меню або бічної панелі. Контекстна навігація функціонує в межах певної категорії та забезпечує переходи між пов'язаними сторінками й інформаційними об'єктами, наприклад між книгами одного автора, виданнями

певної тематики або пов'язаними категоріями. Внутрішня навігація забезпечує орієнтацію користувача в межах окремої сторінки або структури сайту й може реалізовуватися за допомогою хлібних крихт, карти сайту та інших елементів гіпертекстової навігації. Поєднання цих типів навігації формує цілісну систему, яка сприяє зручному та швидкому пошуку інформації в електронному каталозі.

Формат URL-адрес є важливою складовою проєктування веб сайту, оскільки зрозуміла та логічно сформована адреса сторінки полегшує орієнтування користувачів у структурі ресурсів та сприяє його ефективній індексації пошуковими системами. Використання змістовних URL-адрес дає змогу відображати призначення конкретної сторінки безпосередньо в її адресі, що підвищує її зрозумілість і запам'ятовуваність.

Для електронного каталогу доцільно використовувати семантично структуровані URL-адреси, які містять зрозумілі ідентифікатори інформаційних об'єктів. Наприклад, адреси, що містять позначення «document», «author», «category» або інші відповідні параметри, які дають змогу визначити тип інформації, представленої на сторінці. Послідовне використання єдиного принципу формування URL-адрес забезпечує цілісність структури сайту, полегшує навігацію та сприяє ефективній організації пошукового функціоналу електронного каталогу.

Основою інформаційної системи становить база даних у який зберігається структурована інформація про книжковий фонд бібліотеки. Вона забезпечує централізоване зберігання, упорядкування та доступ до бібліографічних відомостей. Функціональна логіка роботи з даними реалізується за допомогою програмних модулів, відповідальних за введення нової інформації, її редагування та оновлення, відображення записів користувачам, а також пошук і фільтрацію необхідних відомостей. Така організація забезпечує узгоджену взаємодію між базою даних, програмною частино системи та користувацьким інтерфейсом.

Для реалізації серверної частини електронного каталогу було обрано мову програмування Python [8]. Такий вибір зумовлений низкою її переваг, серед яких простий і зрозумілий синтаксис, що сприяє прискоренню процесу розроблення та зменшенню ймовірності виникнення помилок. Важливою перевагою Python є також розвинена стандартна бібліотека та широка екосистема сторонніх пакетів, які забезпечують готові засоби для реалізації типових програмних завдань. Це дає змогу скоротити час розроблення та зосередитися на реалізації функціональних особливостей електронного каталогу. Підтримка об'єктно-орієнтованого програмування, у свою чергу, сприяє формуванню логічної, модульної та структурованої архітектури програмної системи.

Для розроблення веб частини використано високорівневий веб фреймворк Django. Його застосування дає змогу суттєво прискорити розроблення веб систем завдяки наявності готових компонентів і засобів для реалізації типових функцій. Django дотримується концепції «батарейки в комплекті» (batteries included), відповідно до яких фреймворк містить широкий набір вбудованих інструментів для розв'язання поширених завдань веб розробки, зокрема роботи з базами даних, маршрутизації URL, оброблення запитів, автентифікація користувачів та адміністрування даних. Це робить Django доцільним вибором для створення функціонального, структурованого та масштабованого електронного каталогу.

Ключовою перевагою Django вбудована система ORM (об'єктно-реляційне відображення, Object-Relational Mapping), яка забезпечує ручну взаємодію програмного коду з базою даних. Завдяки ORM розробник може працювати з даними через об'єкти та моделі Python, не формуючи вручну більшість SQL-запитів. Це спрощує процес створення, отримання, редагування та видалення записів у базі даних.

Важливою складовою Django є система міграцій, яка дає змогу автоматизовано формувати та змінювати структуру бази даних відповідно до

визначених моделей. На основі описаних моделей система генерує необхідні зміни структури таблиць, що зменшує обсяг ручної роботи, спрощує супровід бази даних і знижує ймовірність виникнення помилок під час її проєктування та подальшої модифікації.

Django також містить вбудовану систему автентифікації та авторизації, яка забезпечує розмежування прав доступу користувачів і є важливим компонентом захисту адміністративної частини електронного каталогу. Завдяки цим засобам можна організувати безпечний доступ до функцій керування даними та визначити відповідні рівні повноважень для різних категорій користувачів.

Важливою перевагою фреймворку є наявність вбудованих механізмів захисту від поширених веб загроз, зокрема SQL-ін'єкцій, міжсайтового скриптингу (XSS) та міжсайтової підробки запитів (CSRF). Використання цих механізмів підвищує рівень захищеності веб системи та сприяє безпечній обробці користувацьких запитів і даних.

Для розроблення користувацького інтерфейсу електронного каталогу використовуються сучасні стандартні веб технології, зокрема HTML5 та CSS3.

HTML5 забезпечує структуровану та семантичну розмітку веб сторінок, що сприяє логічній організації контенту, підвищує доступність ресурсу для користувачів і покращує його взаємодію з пошуковими системами.

CSS3 застосовується для оформлення та стилізації елементів інтерфейсу, визначення їх розташування, розмірів, шрифтів та інших візуальних характеристик. Використання каскадних таблиць стилів дає змогу сформувати цілісний і привабливий дизайн веб сайту, а також забезпечити узгоджене відображення його сторінок на різних пристроях і розмірах екранів.

Для створення адаптивного та зручного користувацького інтерфейсу було обрано CSS-фреймворк Bootstrap. Його використання зумовлене наявністю готових компонентів і засобів для побудови сучасних веб

інтерфейсів, що дає змогу скоротити час розроблення та забезпечити єдиний стиль оформлення сторінок.

Однією з основних переваг Bootstrap є вбудована система адаптивної сітки, яка дає змогу автоматично змінювати розташування та розміри елементів залежно від ширини екрана. Завдяки цьому інтерфейс електронного каталогу може коректно відображатися на різних пристроях – від персональних комп'ютерів і ноутбуків до планшетів та смартфонів. Використання готових механізмів адаптивності значно спрощує процес розроблення порівняно з реалізацією всіх медіазапитів і правил адаптивного дизайну вручну.

Розроблення веб сайту «Бібліотека» розпочалося з підготовки програмного середовища та формування базової структури проєкту. Першим етапом було встановлення інтерпретатора Python та створення віртуального середовища для ізоляції залежностей. За допомогою пакетного менеджера pip встановлено Django та необхідні додаткові компоненти, зокрема бібліотека Pillow для роботи із зображеннями обкладинок книг і авторів.

Базову структуру проєкту сформовано засобами Django за допомогою команди startproject. Основні параметри системи визначаються у фалі settings.py, маршрутизація - urls.py, а файл - manage.py використовується для керування проєктом. Наступним етапом стало створення застосунку каталогу командою startapp. Його основні компоненти представлені файлами models.py для опису структури даних, views.py – для реалізації логіки оброблення запитів, admin.py – для налаштування адміністративної панелі, а також шаблонами та статистичними ресурсами для формування користувацького інтерфейсу.

Для зберігання даних використано SQLite – файлову реляційну базу даних, інтегровану в стандартну конфігурацію Django. Вона не потребує додаткового серверного налаштування та є зручною для розроблення й тестування системи. Дані про книги, авторів та інші об'єкти каталогу зберігаються у файлі db.sqlite3, а структура бази даних формується і оновлюється за допомогою механізму міграцій Django.

Для зберігання та керування інформацією про бібліотечний фонд у середовищі Django було розроблено моделі бази даних, які реалізовано у файлі models.py. Основними сутностями системи є Автор і Книга, між якими встановлено взаємозв'язок.

Модель Author призначена для зберігання відомостей про авторів і містить поле name типу CharField для повного імені та необов'язкове поле типу ImageField для зберігання фотографії. Для коректного текстового представлення об'єктів визначено метод _str_(), який повертає ім'я автора.

Модель Book є основною сутністю електронного каталогу та містить інформацію про видання. Вона включає поля для назви книги, автора, жанру, ISBN, опису (description) та обкладинки (cover_image). Зв'язок із моделлю Author реалізовано за допомогою ForeignKey, що дає змогу пов'язати книги з відповідними авторами та отримувати перелік їхніх видань. Для жанру передбачено обмежений набір визначених категорій, зокрема фентезі, детектив, наукову фантастику, романтику, класику та інші.

Взаємодія з базою даних здійснюється через Django ORM, що дає змогу працювати з об'єктами моделей та API QuerySet без необхідності безпосереднього написання SQL-запитів. Після визначення моделей їх структуру було перенесено до бази даних за допомогою системи міграцій Django: команда makemigrations формує файли міграцій на основі змін у моделях, а команда migrations застосовує їх і створює відповідні таблиці в SQLite.

Використання зовнішнього ключа між моделями Book та Author забезпечує цілісність і узгодженість даних. Така структура спрощує подальше розширення системи, оскільки нові поля та функціональні можливості можуть додаватися до моделей без суттєвої перебудови всієї бази даних.

Наступним етапом розроблення системи стала реалізація адміністративної панелі, яка забезпечує зручне керування даними електронного

каталогу. Вона є невід'ємною складовою веб застосунку «Бібліотека» та призначена для адміністрування інформації.

Адміністративна панель надає уповноваженим працівникам бібліотеки можливість додавати, редагувати, видаляти і переглядати записи без безпосереднього доступу до бази даних. Такий підхід спрощує процес актуалізації бібліографічної інформації, зменшує кількість ручних операцій із базою даних і забезпечує централізоване управління вмістом електронного каталогу.

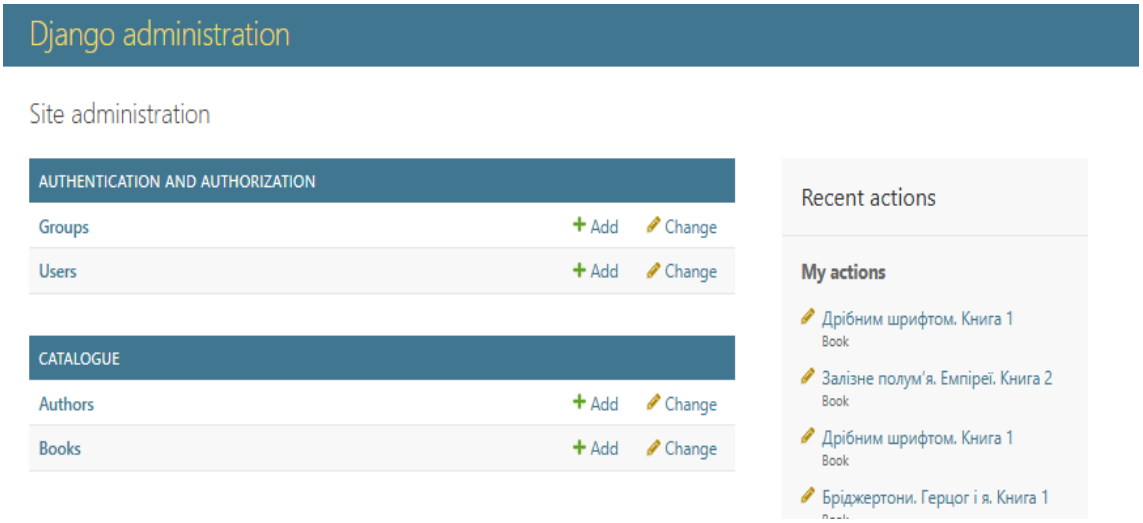

Рисунок 5. Адміністративна панель Django

У середовищі Django панель адміністрування формується на основі визначених моделей бази даних. Для її використання моделі Author і Book реєструються у файлі admin.py, після чого вони стають доступними в адміністративному інтерфейсі, а Django автоматично створює відповідні форми для роботи з даними.

Для доступу до панелі створюється обліковий запис суперкористувача за допомогою команди createsuperuser. Після автентифікації адміністратор отримує доступ до всіх зареєстрованих моделей та основних функцій керування системою.

Для моделі Author адміністративна панель забезпечує додавання, редагування та видалення записів, а також завантаження імені та фотографії

автора. Перелік авторів представлено у табличному вигляді з можливістю сортування та пошуку. Для моделі Book форма адміністрування містить поля для введення назви, вибору автора та жанру, зазначення ISBN, опису і завантаження обкладинки. Перелік книг також може фільтруватися за автором, жанром та іншими параметрами.

Вбудовані засоби пошуку та фільтрації спрощують роботу з великими обсягами бібліографічних даних, забезпечуючи швидкий пошук книг за назвою, автором або жанром. Водночас вбудована система автентифікації та розмежування прав доступу забезпечує захист адміністративної частини каталогу. Виконувати операції зі зміни даних можуть лише авторизовані користувачі з відповідними правами. Адміністративний інтерфейс також підтримує українську мову, що підвищує зручність його використання працівниками бібліотеки.

Після реалізації моделей бази даних та адміністративної панелі наступним етапом розроблення стала реалізація користувацького інтерфейсу електронного каталогу. На відміну від адміністративної частини, орієнтованої на керування даними, користувацький інтерфейс призначений для безпосередньої взаємодії відвідувачів із бібліотечним ресурсом.

Для користувачів електронного каталогу «Бібліотека» було розроблено веб інтерфейс, який забезпечує зручний доступ до інформації про книги та авторів. Основними завданнями інтерфейсу є швидкий перегляд переліку видань, отримання детальної інформації про книгу та автора, а також ефективний пошук необхідних бібліографічних відомостей. При цьому структура сторінок і навігація побудовані таким чином, щоб користувач міг отримати потрібну інформацію з мінімальною кількістю переходів (рис. 6).

Функціональну частину користувацького інтерфейсу реалізовано за допомогою представлень, визначених у фалі views.py застосунку catalog. Вони забезпечують оброблення HTTP-запитів, взаємодію з моделями бази даних та формування HTML-сторінок на основі відповідних шаблонів. Для головної

сторінки створено представлення, яке отримує перелік книг із бази даних і передає його до шаблону для подальшого відображення для користувачеві.

Окреме представлення реалізує функціонал пошуку та обробляє текстові запити користувачів. Після введення ключового слова система виконує пошук за назвою книги, формуючи відповідний запит до бази даних за допомогою Django ORM.

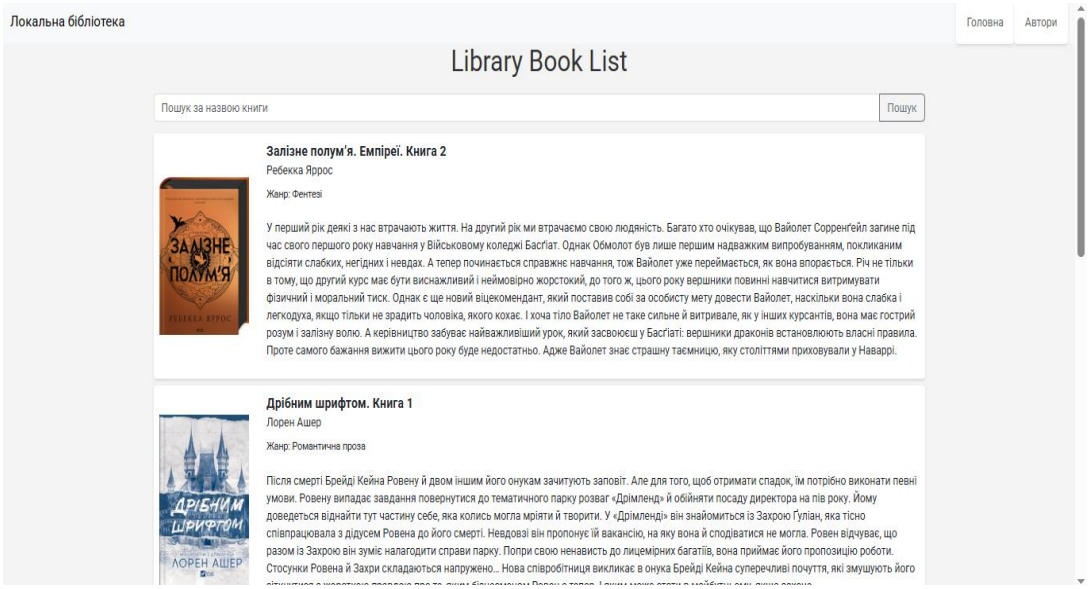

Рисунок 6. Електронний каталог книг

Отримані результати передаються до користувацького інтерфейсу та відображаються у вигляді переліку відповідних видань. Використання вбудованих методів фільтрації Django спрощує реалізацію пошукового механізму та дає змогу працювати з базою даних без безпосереднього написання SQL-запитів.

На рисунку 7 наведено приклад пошуку книг за певними критеріями.

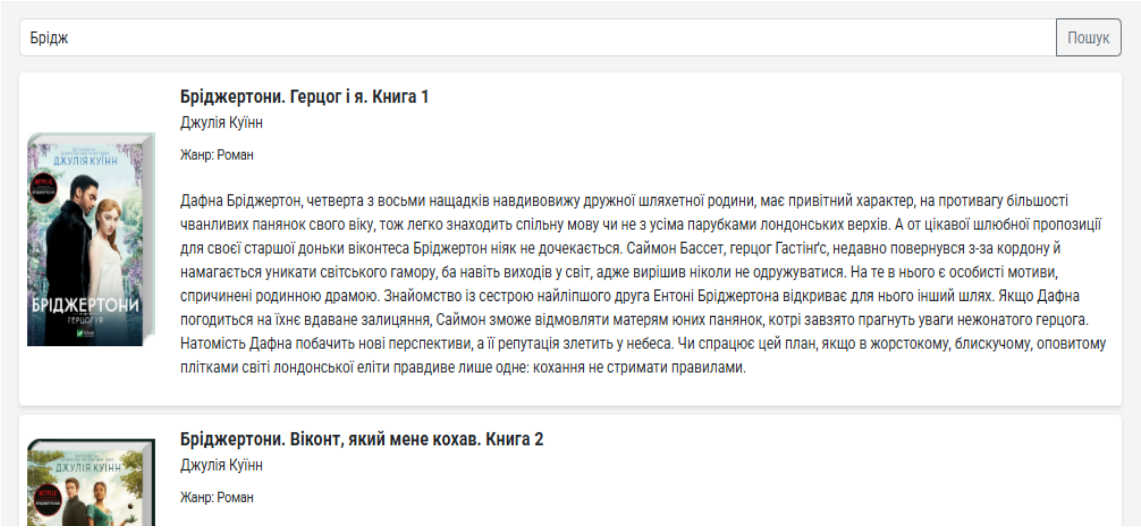

Рисунок 7. Фрагмент роботи пошукової системи каталогу

Наступним етапом реалізації користувацького інтерфейсу стало налаштування маршрутизації та організація представлення бібліографічної інформації. Маршрутизацію URL-адрес реалізовано у файлі urls.py, де визначено відповідність між адресами веб сторінок і відповідними представленнями. Головна сторінка доступна за кореневою адресою, а пошукові запити обробляються через окремий маршрут.

Інформація про кожне видання представлена у вигляді візуальної картки, що містить назву книги, автора, жанр, обкладинку та опис. Такий формат дає змогу користувачеві швидко ознайомитися з основними характеристиками видання без переходу на окрему сторінку. Результати пошуку відображаються в аналогічному форматі, що забезпечує послідовність і візуальну узгодженість інтерфейсу.

Користувацький інтерфейс розроблено із застосуванням HTML5, CSS3 та Bootstrap. Фреймворк Bootstrap використано для створення адаптивної структури та спрощення оформлення елементів веб сторінок. Навігаційна панель доступна на всіх сторінках каталогу та містить посилання на основні розділи, а також інтегроване поле пошуку, що забезпечує швидкий доступ до пошукового функціоналу незалежно від поточного розділу.

Окрему сторінку передбачено для представлення інформації про авторів (рис. 8). Вона містить перелік авторів каталогу, їхні фотографії та кількість представлених у системі книг. Для кожного автора реалізовано кнопку «Переглянути книги», після натискання якої відкривається модальне вікно (рис. 9) з переліком відповідних видань, їхніми обкладинками, назвами та жанрами. Такий підхід дає змогу отримати додаткову інформацію без переходу на окрему сторінку та підвищує зручність навігації електронним каталогом.

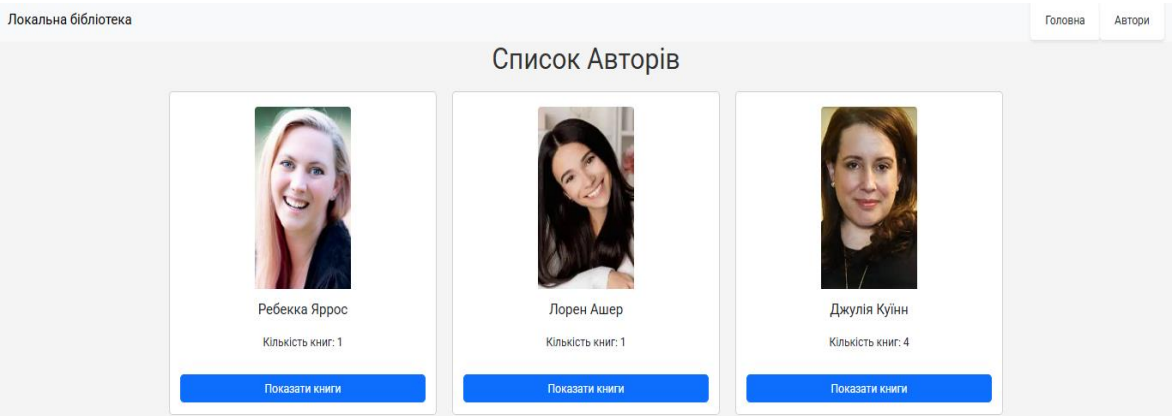

Рисунок 8. Представлення авторів в електронному каталозі

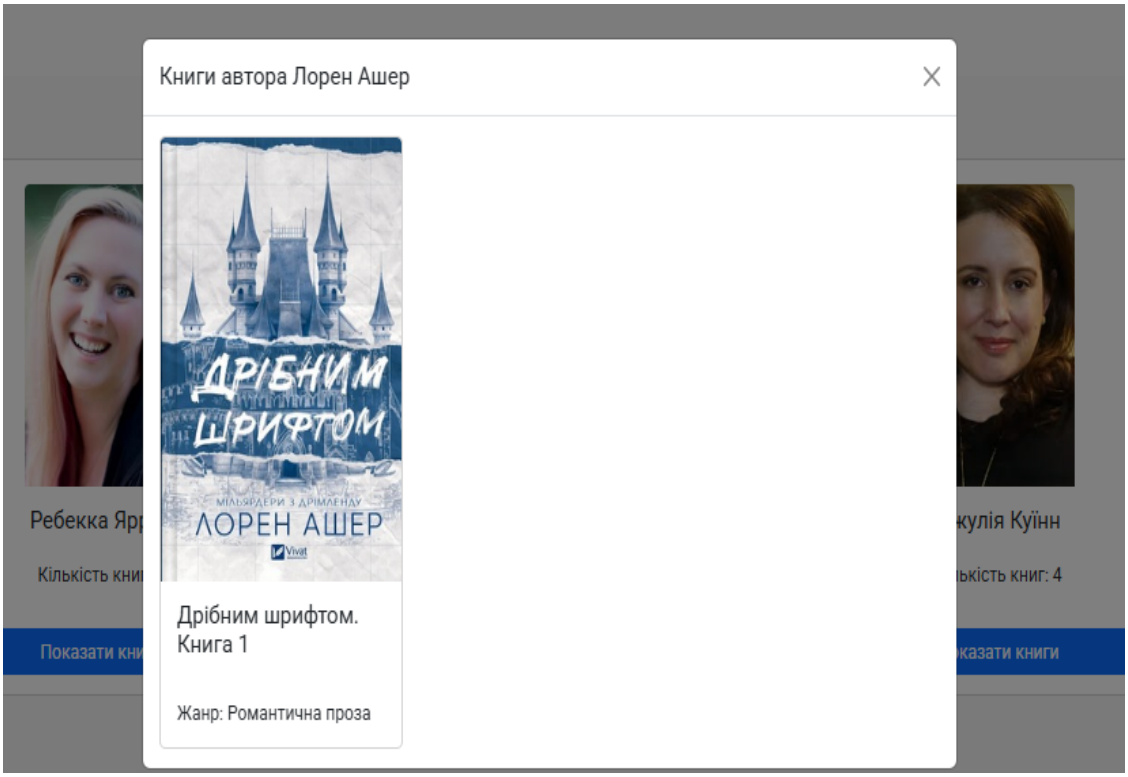

Рисунок 9. Модальне вікно з переліком доступних видань автора

Взаємозв’язок між моделями Author та Book реалізовано за допомогою поля ForeignKey, що забезпечує динамічне формування вмісту модального вікна відповідно до обраного автора. Користувацький інтерфейс побудовано на основі HTML-шаблонів Django та фреймворку Bootstrap, що сприяє створенню сучасного й узгодженого дизайну та забезпечує зручну навігацію між сторінками електронного каталогу. Водночас модальне вікно призначене виключно для перегляду інформації, тому можливість редагування та видалення книг через нього не передбачена, що відповідає визначеним вимогам до користувацької частини системи.

Після завершення етапу реалізації основних компонентів інформаційної системи «Бібліотека» здійснюється її тестування. Цей етап є невід’ємною складовою розробки програмного забезпечення, оскільки дає змогу виявити можливі помилки, перевірити правильність реалізації функціональних можливостей та встановити відповідність розробленої системи зазначеним вимогам.

Тестування охоплює основні складові інформаційної системи: адміністративну панель, операції з даними про авторів і книги, пошуковий функціонал, інтерфейс користувача, а також взаємодію між базою даних і програмними компонентами системи. Особлива увага приділяється перевірці зв’язку між моделями Author та Book, реалізованого за допомогою поля ForeignKey, а також коректності відображення пов’язаних даних у користувацькому інтерфейсі.

Тестування операцій з авторами включало додавання нових записів із фотографією та без неї, редагування та видалення. Встановлено, що створені записи коректно зберігаються в базі даних та відображаються у відповідному розділі каталогу. Зміна атрибутів автора, зокрема імена та зображення, також виконуються коректно.

На рисунку 10 відображено перевірка функції «Додати книгу».

Результати комплексного тестування підтвердили коректність роботи основних функціональних можливостей системи «Бібліотека». Операцій додавання, редагування, видалення та перегляду записів виконується відповідно до визначених вимог.

Пошуковий функціонал забезпечує отримання релевантних результатів за повними та частковими запитами. Користувацький інтерфейс забезпечує структуроване представлення інформації та зручну навігацію між основними розділами системи. Взаємодія програмних компонентів із базою даних здійснюється коректно, а встановлені зв'язки між об'єктами забезпечують цілісність інформації.

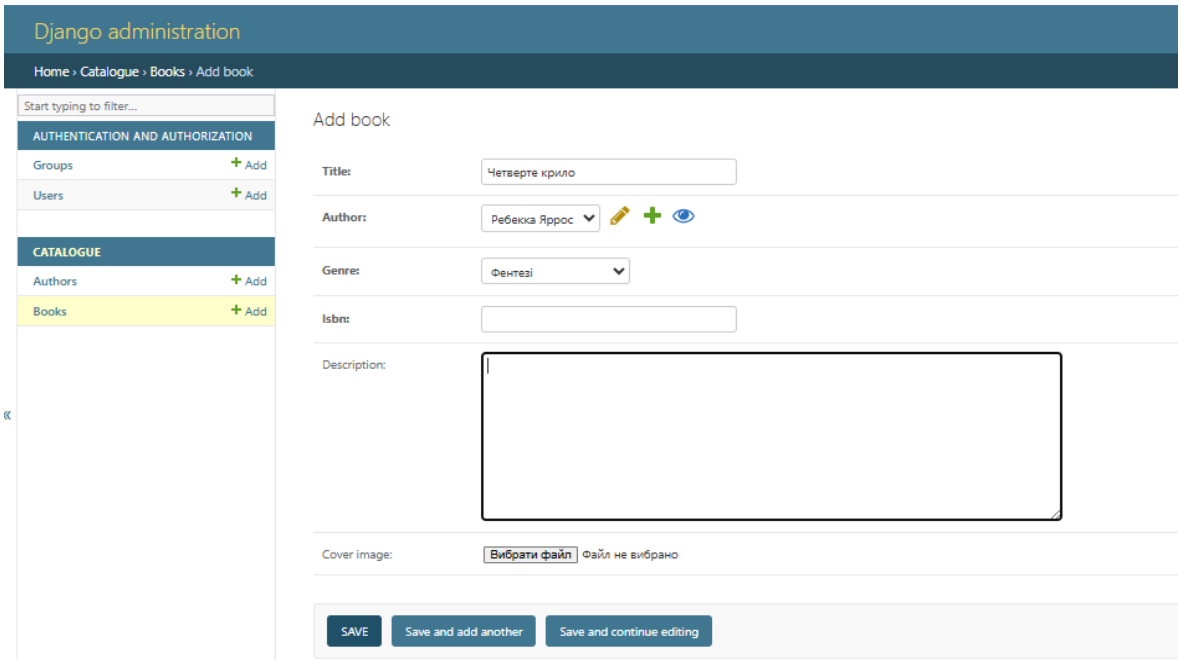

Рисунок 10. Результат тестування функції «Додати книгу»

За результатами тестування критичних помилок та системних збоїв не виявлено. Інформаційна система «Бібліотека» відповідає визначеним функціональним вимогам та може бути використана для роботи з бібліотечними даними. Реалізована архітектура створює також передумови для подальшого розширення функціональної системи.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує актуальність і необхідність цифрової трансформації бібліотечно-інформаційних процесів у закладах професійної освіти. Перехід від традиційних каталогів до веб-орієнтованих інформаційних систем є не лише технологічним оновленням, а й стратегічною відповіддю на виклики сучасного освітнього середовища. Аналіз функціонування електронних каталогів провідних бібліотек України дозволив виявити їхні сильні сторони та обмеження, що стало підґрунтям для формування вимог до розробки системи «Бібліотека».

По-перше, дослідження засвідчило важливість цифровізації бібліотечних процесів як засобу оптимізації рутинних операцій: реєстрації нових надходжень, контролю, видачі та повернення літератури, ведення статистики та формування звітності. Автоматизація зазначених процесів зменшує навантаження на працівників, мінімізує ймовірність помилок та забезпечує достовірність даних. Це, у свою чергу, підвищує ефективність інформаційного супроводу студентів, викладачів та дослідників.

По-друге, особливу роль у створенні сучасних бібліотечних систем відіграють реляційні бази даних, які забезпечують структуроване зберігання інформації та цілісність взаємопов'язаних об'єктів. Використання реляційної моделі дозволяє реалізувати багатопараметричний пошук, комбінування фільтрів та уточнення результатів, що значно розширює функціональні можливості бібліотечного обслуговування.

По-третє, аналіз існуючих електронних каталогів показав, що масштабні національні та університетські системи, попри багатий інформаційний фонд, часто не відповідають сучасним вимогам до дизайну інтерфейсу, адаптивності та інтерактивності. Виявлені недоліки - застарілий візуальний стиль, обмежені можливості персоналізації, відсутність мультимедійних елементів – підтверджують доцільність створення компактних спеціалізованих систем, які поєднують надійність із сучасними веб технологіями та орієнтацією на користувача.

По-четверте, впровадження веб орієнтованих інформаційних ресурсів забезпечує універсальний доступ до бібліографічних даних незалежно від місць перебування та типу пристрою. Це відповідає вимогам цифрового освітнього середовища, де мобільність і гнучкість є ключовими характеристиками. Використання сучасних програмних фреймворків підвищує надійність системи, скорочує час розробки та спрощує її супровід.

Дослідження підтвердило практичну значущість запропонованої системи для проведення аналітичної роботи. Структуровані дані дозволяють формувати статистичні показники, аналізувати використання фонду, визначати читацькі запити та оцінювати ефективність роботи бібліотеки. Це створює підґрунтя для прийняття управлінських рішень та стратегічного планування у сфері професійної освіти.

Нарешті, запропонований підхід має університетський характер і може бути адаптований до різних освітніх установ. Структура бази даних та принципи організації веб ресурсу можуть бути модифіковані відповідно до специфіки конкретного закладу, слугуючи основою для створення або модернізації його цифрової інформаційної інфраструктури. Модульна архітектура системи відкриває можливості для подальшого розширення функціоналу – інтеграції семантичного збагачення даних, рекомендаційних механізмів та інтелектуальних пошукових алгоритмів.

Таким чином, результати дослідження формують комплексне бачення розробки та впровадження цифрових інформаційних ресурсів у закладах професійної освіти. Система «Бібліотека» демонструє, як технологічні інновації можуть підвищити ефективність та якість бібліотечних послуг, водночас сприяючи цифровій трансформації освітнього середовища. Стратегічна важливість компактних, користувацько – орієнтованих рішень, що поєднує надійне управління даними із сучасними веб технологіями, визначає перспективи сталого розвитку бібліотечних веб систем у цифрову епоху.

References:

Федорук О., Зубарєва М. (2026). Сучасні підходи до автоматизації бібліотечних процесів у закладах вищої освіти // Бібліотекознавство. Документознавство. *Інформологія: наук. журн*. / М-во культури України, Нац. акад. керів. кадрів культури і мистецтв. – Київ: НАКККіМ, 2026. № 1. С. 13–22. DOI: 10.32461/2409-9805.1.2026.356328.

Наливайко О. О. (2025). Політика цифровізації бібліотеки: тенденції і напрями впровадження // *Вісник Харківської державної академії культури*. 2025. Вип. 67. С. 95–111. DOI: 10.31516/2410-5333.067.07.

Somipam R. Shimray, A. (2025). Subaveerapandiyan, Naved Ahmad. Digital transformation in academic libraries: e-resources, OPACs and AI in information discovery // *Reference Services Review*. 2025. Vol. 53, No. 2. P. 238–255. DOI: 10.1108/RSR-12-2024-0078 .

Bernasconi E., Ceriani M., Mecella M., Catarci T. (2023). Design, realization, and user evaluation of the ARCA system for exploring a digital library // *International Journal on Digital Libraries*. 2023. Vol. 24, Issue 1. P. 1–22. DOI: 10.1007/s00799-022-00343-0 .

Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nbuv.gov.ua/

Е-каталог Наукова бібліотека імені Михайла Максимовича КНУ імені Тараса Шевченка [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/poshuk.php3

Електронний каталог бібліотеки Національного авіаційного університету [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ufd.lib.nau.edu.ua:8080/library/DocSearchForm

Python Software Foundation. Python Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.python.org/3/

Django Software Foundation. Django Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.djangoproject.com/en/5.2/

Bootstrap Team. Bootstrap Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://getbootstrap.com/

SQLite Official Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.sqlite.org/docs.html

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-184
UDC 664.68:664.7:613.292

CHAPTER 6.
THE USE OF SECONDARY GRAIN RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF FLOUR-BASED CONFECTIONERY PRODUCTS WITH AN INCREASED FIBRE CONTENT

Yevheniia DEMYDOVA
Doctor of Philosophy (PhD)
Sumy National Agrarian University,
Department of Food Technology and Safety
(160 Gerasima Kondratyeva Street, Sumy, 40000, Ukraine)
yevheniia.demydova@snau.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-7933-4251

Tetyana SYNENKO
Doctor of Philosophy (PhD)
Sumy National Agrarian University,
Department of Food Technology and Safety
(160 Gerasima Kondratyeva Street, Sumy, 40000, Ukraine)
tetiana.synenko@snau.edu.ua
https://orcid.org/0000–0002–5300–5142

Abstract. This study substantiates the feasibility of using brewers' spent grain as a secondary cereal raw material in the production of flour-based confectionery products. The aim of the study was to determine rational parameters for the use of brewers' spent grain powder and to develop oat cookies with an increased dietary fibre content. The chemical composition, particle size distribution, and functional and technological properties of the powder were investigated, along with the effects of particle size and incorporation level on the sensory and technological characteristics of model cookie samples. Based on the combined assessment of nutritional, functional, technological, and sensory characteristics, the 300 μm powder fraction was found to be the most suitable. Compared with wheat flour, this fraction exhibited higher water absorption and fat-binding capacities. Based on model formulations containing 10–30% brewers' spent grain powder, a rational incorporation level of 20% of the total flour mixture was established. Using these parameters, a formulation for "Sumchanka" oat cookies was developed. The incorporation of brewers' spent grain powder increased the protein content from 7.5 to 11.1 g/100 g and the calculated dietary fibre content from 1.7 to 3.3 g/100 g compared with the traditional sample. The developed product demonstrated acceptable organoleptic, physicochemical, and microbiological characteristics. Based on a comprehensive assessment of microbiological and sensory stability, a shelf life of no more than 49 days was substantiated at a temperature of (18±3) °C and a relative humidity of 70–

75%. The results confirm the potential of brewers' spent grain as a functional and technological ingredient for improving the nutrient composition of flour-based confectionery products and for promoting the rational utilisation of secondary resources from brewing production.

Keywords: brewers' spent grain, secondary cereal raw materials, flour-based confectionery products, dietary fibre, functional and technological properties, resource-efficient technologies, nutrient composition, food microbiology.

ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННОЇ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ У ТЕХНОЛОГІЇ БОРОШНЯНИХ КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБІВ ІЗ ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ХАРЧОВИХ ВОЛОКОН

Анотація. У роботі обґрунтовано доцільність використання пивної дробини як вторинної зернової сировини у технології борошняних кондитерських виробів. Метою дослідження було встановлення раціональних параметрів використання порошку пивної дробини та розроблення вівсяного печива з підвищеним вмістом харчових волокон. Досліджено хімічний склад, дисперсність і функціонально-технологічні властивості порошку, а також вплив розміру частинок і рівня його внесення на сенсорні та технологічні характеристики модельних зразків печива. Встановлено, що за сукупністю нутрієнтних, функціонально-технологічних і сенсорних характеристик раціональною є фракція порошку розміром 300 мкм. Порівняно з пшеничним борошном вона характеризувалася вищою вологопоглинальною та жирозв'язувальною здатністю. За результатами дослідження модельних рецептур із внесенням 10–30 % порошку обґрунтовано його раціональну концентрацію на рівні 20 % від маси борошняної суміші. На основі встановлених параметрів розроблено рецептуру вівсяного печива «Сумчанка». Використання порошку пивної дробини забезпечило збільшення вмісту білка з 7,5 до 11,1 г/100 г, а розрахункового вмісту харчових волокон − з 1,7 до 3,3 г/100 г порівняно з традиційним зразком. Розроблений продукт характеризувався прийнятними органолептичними, фізико-хімічними та мікробіологічними показниками. За результатами комплексного оцінювання мікробіологічної та сенсорної стабільності обґрунтовано строк зберігання печива не більше 49 діб за температури (18±3) °С і відносної вологості повітря 70–75 %. Отримані результати підтверджують перспективність використання пивної дробини як функціонально-технологічного інгредієнта для коригування нутрієнтного складу борошняних кондитерських виробів і раціонального використання вторинних ресурсів пивоварного виробництва.

Ключові слова: пивна дробина, вторинна зернова сировина, борошняні кондитерські вироби, харчові волокна, функціонально-технологічні властивості, ресурсоефективні технології, нутрієнтний склад, харчова мікробіологія.

Вступ. Сучасний розвиток харчових технологій характеризується посиленням уваги до нутрієнтного складу продуктів масового споживання. Одним із актуальних напрямів є підвищення вмісту харчових волокон у раціоні населення. Їхнє достатнє надходження пов'язують із підтриманням нормального функціонування травної системи, метаболічного здоров'я та кишкової мікробіоти. Відповідно до рекомендацій Всесвітньої організації охорони здоров'я, дорослим рекомендовано споживати щонайменше 25 г природних харчових волокон на добу *(World Health Organization, 2023)*. Це визначає доцільність розроблення харчових продуктів із модифікованим нутрієнтним складом і підвищеним вмістом природних волокнистих компонентів.

Харчові волокна є неоднорідною групою речовин рослинного походження. Вони відрізняються хімічною будовою, розчинністю, ферментованістю та фізіологічною дією. Сучасні дослідження свідчать, що їхнє значення не обмежується регулюванням моторної функції травного тракту. Окремі фракції харчових волокон є субстратами для кишкової мікробіоти та беруть участь у формуванні метаболічного середовища кишечника. Водночас фізіологічні ефекти значною мірою визначаються структурою та функціональними властивостями конкретного виду волокон *(Delzenne N., Bindels L., Neyrinck A., Walter J., 2025)*. Тому під час розроблення збагачених продуктів важливим є не лише збільшення загальної кількості харчових волокон, а й обґрунтований вибір їх природного джерела.

Перспективним способом коригування структури харчування є реформулювання традиційних продуктів, які регулярно споживає населення. Такий підхід дозволяє покращувати їхній нутрієнтний профіль без істотної зміни харчових звичок споживачів. У сучасних дослідженнях реформулювання розглядається як один із практичних інструментів підвищення якості харчування, зокрема шляхом збільшення частки харчових волокон у складі готових продуктів *(Daoust L., 2024)*.

Значний потенціал у цьому напрямі мають борошняні кондитерські вироби. Вони характеризуються широким асортиментом, доступністю та стабільним попитом споживачів. Водночас значна частина такої продукції виготовляється з використанням рафінованого пшеничного борошна, що характеризується нижчим вмістом волокнистих компонентів порівняно із цільнозерновою сировиною та продуктами перероблення периферійних частин зерна. Тому часткова заміна традиційного борошна природними джерелами харчових волокон є перспективним напрямом удосконалення рецептурного складу цієї групи продуктів.

Печиво є зручною харчовою матрицею для реалізації цього підходу. Особливості його рецептури дозволяють використовувати додаткові сухі компоненти рослинного походження та частково замінювати традиційну борошняну сировину. Проте внесення волокнистих інгредієнтів може суттєво впливати на процеси гідратації, структуроутворення, реологічні характеристики тіста, колір, твердість і сенсорні властивості готової продукції *(Lin S., 2022).* Відповідно, розроблення печива з підвищеним вмістом харчових волокон потребує комплексного обґрунтування складу рецептурної суміші та технологічних параметрів її перероблення.

Окремий науковий і практичний інтерес становить залучення до виробництва харчових продуктів вторинної зернової сировини. Її використання дає змогу поєднати нутрієнтне збагачення продукції з принципами раціонального використання ресурсів. Такий підхід відповідає сучасній концепції циркулярної біоекономіки, відповідно до якої побічні продукти харчових виробництв розглядаються як потенційні джерела цінних харчових інгредієнтів.

До перспективних видів вторинної зернової сировини належить пивна дробина – основний твердий побічний продукт пивоварного виробництва. Значні обсяги її утворення зумовлюють необхідність пошуку ефективних напрямів подальшого використання. Сучасні дослідження демонструють

можливість залучення пивної дробини до технологій хліба, печива, снеків, макаронних і кондитерських виробів *(Oyedeji A. B., Wu J., 2023; Naibaho J., Pudło A., Bobak Ł., Wojdyło A., Alemany López Á., Pangestika L., Andayani S., Korzeniowska M., Yang B., 2024).* Це дозволяє розглядати її не як відхід виробництва, а як вторинний сировинний ресурс із потенціалом повторного використання у харчовому ланцюгу.

До складу пивної дробини входять волокнисті та білкові компоненти, ліпіди, мінеральні та біологічно активні речовини. Саме поєднання харчових волокон і рослинного білка визначає значний потенціал цієї сировини для модифікації нутрієнтного складу борошняних виробів *(Jaeger A., Sahin A., Nyhan L., Zannini E., Arendt E., 2023; Dancker P., Glas K., Gastl M, 2025).* Водночас склад пивної дробини залежить від вихідної зернової сировини та параметрів технологічного процесу. Тому її використання потребує попереднього дослідження властивостей конкретної сировини.

Важливим обмеженням є висока вологість свіжої пивної дробини, що знижує її стабільність під час зберігання. Для використання у складі сухих рецептурних сумішей необхідне попереднє стабілізування сировини. Перспективним способом є сушіння з подальшим подрібненням та одержанням порошкоподібного інгредієнта. Така технологічна форма забезпечує можливість дозування, фракціонування та рівномірнішого розподілу пивної дробини у борошняній системі *(Sanches M., Augusto P., Polachini T., Telis-Romero J., 2023; Naibaho J., Pudło A., Bobak Ł., Wojdyło A., Alemany López Á., Pangestika L., Andayani S., Korzeniowska M., Yang B., 2024)*.

Проте технологічна ефективність використання порошку пивної дробини визначається не лише його хімічним складом. Важливими є дисперсність, водо- та жирозв’язувальна здатність, концентрація у рецептурі та характер взаємодії з іншими компонентами. Надмірне внесення волокнистої сировини може призводити до зміни консистенції тіста, кольору, структури та сенсорної прийнятності готової продукції. Дослідження печива з пивною дробиною

підтверджують необхідність пошуку компромісу між нутрієнтним збагаченням і збереженням належних споживчих характеристик *(Wang X., Xu Y., Teo S. Q., Heng C. W., Lee D. P. S., Gan A. X., Kim J. E., 2023*; *Nguyen Q. C., Castura J. C., Nguyen D. D. L., Varela P., 2023*; *Nicolai M., Palma M., Reis R., Amaro R., Fernandes J., Gonçalves E. M., Silva M., Lageiro M., Charmier A., Maurício E., Branco P., Palma C., Silva J., Nunes M. C., Fernandes P. C. B., Pereira P., 2025).*

Таким чином, наукова проблема полягає у встановленні раціональних параметрів використання порошку пивної дробини у конкретній рецептурній системі. Для вівсяного печива необхідно визначити технологічно доцільну дисперсність сировини та рівень заміни традиційного борошна. Також важливим є встановлення впливу рецептурної модифікації на органолептичні, фізико-хімічні, нутрієнтні та мікробіологічні характеристики готового продукту. Такий комплексний підхід дозволяє оцінити пивну дробину одночасно як джерело харчових волокон і як функціонально-технологічний компонент борошняної системи.

Метою дослідження є наукове обґрунтування використання порошку пивної дробини в технології борошняних кондитерських виробів та розроблення вівсяного печива з підвищеним вмістом харчових волокон шляхом встановлення взаємозв’язку між складом і функціонально-технологічними властивостями сировини, її дисперсністю, концентрацією в рецептурній композиції та показниками якості готового продукту.

1. Наукові засади використання харчових волокон у технології борошняних кондитерських виробів.

Підвищення харчової цінності продуктів масового споживання є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасних харчових технологій. Особливе місце у вирішенні цього завдання належить збільшенню частки харчових волокон. Їхнє фізіологічне значення пов'язане з підтриманням нормального функціонування травної системи, регулюванням метаболічних процесів та

взаємодією з кишковою мікробіотою *(Delzenne N. M., Bindels L. B., Neyrinck A. M., Walter J., 2025).*

Харчові волокна становлять складну групу вуглеводних та асоційованих із ними компонентів рослинної сировини. До них належать целюлоза, геміцелюлози, пектинові речовини, β-глюкани, резистентні форми крохмалю та інші сполуки. Окремі компоненти відрізняються розчинністю, здатністю утримувати воду та ступенем ферментованості. Тому технологічний і фізіологічний ефект збагачення харчового продукту залежить не лише від кількості внесених волокон, а й від їх походження та структурних особливостей.

Для зернової сировини основна частина волокнистих компонентів локалізована у периферійних тканинах зернівки. Під час виробництва сортового борошна значна частина оболонок та алейронового шару видаляється. Унаслідок цього продукти з рафінованого борошна характеризуються нижчим вмістом харчових волокон порівняно із цільнозерновими продуктами.

Одним із способів коригування такого складу є часткова заміна традиційного борошна рослинною сировиною, багатою на структурні полісахариди. У технології борошняних кондитерських виробів цей підхід має значні перспективи. Рецептурна система печива дозволяє додавати додаткові сухі компоненти та регулювати співвідношення різних видів борошняної сировини.

На відміну від хлібного тіста, формування максимально розвиненої клейковинної структури для печива переважно не є основною технологічною метою. Це розширює можливості використання безклейковинних і високоволокнистих компонентів. Водночас їхнє внесення змінює співвідношення води, білків, крохмалю, ліпідів та інших складових рецептурної системи. У результаті можуть змінюватися пластичність тіста, його

формувальна здатність, розтікання заготовок, структура та твердість готових виробів *(Lin S., 2022).*

Отже, технологічна ефективність збагачення печива не може оцінюватися лише за кількістю додатково внесених харчових волокон. Необхідний комплексний аналіз нутрієнтних, структурно-механічних, фізико-хімічних і сенсорних характеристик продукту.

Перспективним напрямом розширення сировинної бази харчової промисловості є використання побічних продуктів переробки зерна. Значна їхня частина зберігає компоненти, вилучені або відокремлені під час основного виробничого процесу. Серед них особливий інтерес становлять харчові волокна, білки, мінеральні речовини та фенольні сполуки.

Залучення такої сировини до повторного харчового використання має подвійне значення. З одного боку, вона може бути джерелом природних функціональних компонентів. З іншого – її перероблення сприяє більш повному використанню сировинних ресурсів та скороченню кількості побічних продуктів харчових виробництв.

Одним із найбільш перспективних вторинних ресурсів зернового походження є пивна дробина. Вона утворюється після вилучення сусла з подрібненого солоду та представлена переважно оболонковими структурами зернівки, а також залишками алейронового шару й ендосперму. Саме особливості морфологічного складу зумовлюють значну частку структурних полісахаридів у цій сировині *(Falade E., Kouamé K., Zhu Y., Zheng Y., Ye A , 2025).*

За сучасними науковими даними, волокнистий комплекс пивної дробини представлений передусім целюлозою, геміцелюлозами та арабіноксиланами. Поряд із ними сировина містить білкові речовини, ліпіди, мінеральні компоненти та фенольні сполуки *(Jaeger A., Sahin A., Nyhan L., Zannini E., Arendt E.K., 2023; Naibaho J., Pudło A., Bobak Ł., Wojdyło A., Alemany López Á.,*

Pangestika L., Andayani S., Korzeniowska M., Yang B., 2024; *Dancker P., Glas K., Gastl M., 2025).*

Наявність рослинного білка додатково підвищує харчовий потенціал пивної дробини. Його кількість може істотно варіювати залежно від виду солоду, технології пивоваріння та умов подальшого оброблення сировини. За даними *Dancker P., Glas K., Gastl M. (2025)*, білкова складова пивної дробини представлена різними фракціями зернових білків.

Таким чином, пивна дробина принципово відрізняється від очищених харчових волоконних препаратів. Її введення змінює не одну складову рецептури, а комплексний нутрієнтний профіль продукту. Це створює можливості для одночасного підвищення вмісту волокнистих і білкових компонентів.

Водночас багатокомпонентний склад ускладнює прогнозування поведінки сировини у харчовій системі. Волокнисті, білкові та ліпідні компоненти можуть одночасно брати участь у зв'язуванні води та жиру, формуванні структури тіста та перебігу процесів під час випікання.

Одним із головних обмежень безпосереднього використання свіжої пивної дробини є її висока вологість. Після завершення технологічного процесу пивоваріння сировина містить значну кількість води. У поєднанні з наявністю органічних речовин це створює сприятливі умови для мікробіологічних і ферментативних змін.

Тому використання пивної дробини як стабільного харчового інгредієнта потребує її попереднього консервування. Серед можливих способів особливе значення має сушіння. Зниження вмісту вологи підвищує стабільність сировини та створює умови для її подальшого подрібнення *(Sanches M. A. R., Augusto P. E. D., Polachini T. C., Telis-Romero J., 2023).*

Разом із тим, режим сушіння повинен забезпечувати не лише видалення води. Важливим є максимальне збереження нутрієнтних і функціонально-технологічних характеристик сировини. Інтенсивність теплового впливу може

змінювати структуру білків, волокнистих компонентів і біологічно активних речовин. Тому вибір способу стабілізації є одним із важливих етапів підготовки пивної дробини до харчового використання *(Yilmaz M. S., Şakiyan Ö., 2026).*

Після сушіння перспективним є подрібнення сировини до порошкоподібного стану. Ця операція підвищує технологічність інгредієнта, спрощує його дозування та забезпечує рівномірний розподіл у рецептурній суміші.

Ступінь подрібнення при цьому набуває самостійного технологічного значення. Зменшення розміру частинок збільшує площу поверхні контакту з іншими компонентами тіста. Водночас надто грубі частинки можуть негативно впливати на однорідність структури та сенсорне сприйняття готового виробу.

Використання порошку пивної дробини не можна розглядати як просту механічну заміну частини пшеничного борошна. Така заміна супроводжується зміною співвідношення основних структуроутворювальних компонентів рецептурної системи.

Однією з найважливіших характеристик волокнистої сировини є здатність взаємодіяти з водою. Гідроксильні групи структурних полісахаридів сприяють зв'язуванню води. У результаті внесення пивної дробини може збільшитися потреба рецептурної системи у рідкій фазі та змінитися консистенція тіста.

З технологічної позиції це має подвійне значення. Помірне вологозв'язування може сприяти формуванню необхідної консистенції. Надмірне зв'язування води здатне знижувати пластичність тіста та змінювати структуру готового печива.

Також важливим є характер взаємодії порошку з жировою фазою. Жир у рецептурі печива впливає на пластичність тіста, обмежує надмірну гідратацію борошняних білків і бере участь у формуванні крихкої структури. Тому перерозподіл жирової фази за наявності волокнистого інгредієнта може змінювати реологічні характеристики тіста.

Функціональна поведінка пивної дробини визначається спільною дією її полісахаридних, білкових та інших компонентів. Саме тому результати, одержані для ізольованих препаратів клітковини, не можна безпосередньо переносити на цілий порошок пивної дробини.

Це положення є важливим для подальшої розробки рецептури. Раціональний рівень внесення порошку має визначатися експериментально з урахуванням характеристик конкретної сировини.

Можливість повернення пивної дробини до харчового ланцюга активно досліджується протягом останніх років. Її використовують у технологіях хліба, печива, снеків, макаронних виробів, мафінів та інших продуктів *(Oyedeji A. B., Wu J., 2023; Naibaho J., Pudło A., Bobak Ł., Wojdyło A., Alemany López Á., Pangestika L., Andayani S., Korzeniowska M., Yang B., 2024).*

Результати досліджень підтверджують можливість підвищення вмісту харчових волокон і білка у готових виробах. Проте збільшення концентрації пивної дробини часто супроводжується змінами кольору, твердості, крихкості, пористості та смако-ароматичних характеристик. Саме тому максимально можливий рівень заміни борошна не завжди є технологічно оптимальним.

Wang X., Xu Y., Teo S. Q., Heng C. W., Lee D. P. S., Gan A. X., Kim J. E. (2023) досліджували використання ферментованої пивної дробини у рецептурі печива. Внесення 15 % інгредієнта дозволяло отримати загальну споживчу прийнятність, близьку до прийнятності контрольного зразка. Збільшення концентрації до 30 % покращувало окремі показники харчової цінності, але негативно впливало на сприйняття смаку та загальну прийнятність продукту.

Вплив дисперсності пивної дробини на сприйняття печива підтверджено. Автори встановили, що розмір частинок впливає на текстурні характеристики та сенсорне сприйняття продукту. Надмірна твердість, щільність і тривале пережовування можуть бути чинниками зниження споживчої прихильності. *(Nguyen Q. C., Castura J. C., Nguyen D. D. L., Varela P., 2023).*

Результати дослідження *(Nicolai M., Palma M., Reis R., Amaro R., Fernandes J., Gonçalves E. M., Silva M., Lageiro M., Charmier A., Maurício E., Branco P., Palma C., Silva J., Nunes M. C., Fernandes P. C. B., Pereira P., 2025)* також демонструють взаємозв'язок між рівнем заміни борошна та структурними характеристиками печива. Підвищення частки пивної дробини забезпечувало істотне збільшення кількості харчових волокон, однак водночас супроводжувалося підвищенням твердості виробів. Це підтверджує необхідність технологічної оптимізації рецептури.

У попередніх дослідженнях *Синенко Т.* та *Юрченко В. (2024)* встановлено можливість використання порошку пивної дробини у технології кексів. Одержані результати підтвердили перспективність вторинної пивоварної сировини для формування борошняних кондитерських систем із модифікованим нутрієнтним складом. Водночас раціональна концентрація такого інгредієнта має встановлюватися окремо для кожної групи виробів, оскільки особливості структуроутворення кексів і печива суттєво відрізняються.

Отже, сучасні дослідження підтверджують перспективність використання пивної дробини у технології борошняних виробів. Проте її ефективне застосування потребує комплексного врахування хімічного складу, способу стабілізації, дисперсності та функціонально-технологічних властивостей.

Для технології вівсяного печива особливого значення набуває встановлення такої концентрації порошку, яка забезпечує підвищення частки харчових волокон без критичного погіршення технологічних і сенсорних характеристик. Тому наступним етапом є експериментальне дослідження конкретного порошку пивної дробини, визначення його властивостей, раціонального ступеня подрібнення та рівня внесення до рецептурної композиції.

2. Наукове обґрунтування використання порошку пивної дробини як джерела харчових волокон.

Використання вторинної зернової сировини у виробництві харчових продуктів потребує комплексного оцінювання її складу та технологічної придатності. Значний вміст фізіологічно цінних компонентів сам по собі не є достатньою підставою для включення нового інгредієнта до рецептури. Важливими є фізичний стан сировини, її дисперсність, здатність взаємодіяти з водною та жировою фазами, а також характер впливу на структуру і сенсорні характеристики готового продукту.

Для пивної дробини особливого значення набуває попередня стабілізація. Висока початкова вологість обмежує можливість тривалого зберігання та безпосереднього використання цієї сировини у сухих рецептурних композиціях. Тому доцільним є її переведення у порошкоподібний стан шляхом сушіння, подрібнення та фракціонування. Така форма дозволяє не лише підвищити стабільність сировини, а й забезпечити її дозування та рівномірний розподіл у борошняній суміші.

Хімічний склад пивної дробини може змінюватися залежно від виду зернової сировини, технології солодорощення, рецептури пива та параметрів пивоварного процесу. Проте характерною її особливістю залишається поєднання волокнистої та білкової складових, що обґрунтовує перспективність використання у продуктах із модифікованим нутрієнтним складом (*Oyedeji A. B., Wu J., 2023*; *Naibaho J., Pudło A., Bobak Ł., Wojdyło A., Alemany López Á., Pangestika L., Andayani S., Korzeniowska M., Yang B., 2024*; *Dancker P., Glas K., Gastl M.).*

У попередньо опублікованих дослідженнях Синенко Т. та Юрченко В. (2024) використовували свіжу пивну дробину, отриману в ТОВ «Sumy Craft Brewery». Сировину піддавали інфрачервоному сушінню, після чого подрібнювали та фракціонували. Зміни її складу наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Хімічний склад пивної дробини до та після сушіння і подрібнення

Показник	Свіжа пивна дробина, %	Порошок пивної дробини, %
Волога	70,6±1,2	8,1±0,4
Білок	6,8±0,5	21,2±0,5
Ліпіди	1,5±0,3	8,3±0,2
Вуглеводи	16,3±1,5	50,2±1,3
у тому числі клітковина	4,0±0,2	17,5±0,8
Зольні речовини	0,7±0,2	2,7±0,3

Джерело: складено за даними (Синенко Т., Юрченко В., 2024).

У процесі сушіння масова частка вологи зменшувалася від 70,6 до 8,1 %. Унаслідок видалення значної кількості води відбувалося концентрування сухих компонентів у розрахунку на масу отриманого порошку. Масова частка білка в ньому становила 21,2 %, клітковини – 17,5 %, ліпідів – 8,3 %, зольних речовин – 2,7 % *(Синенко Т., Юрченко В., 2024)*.

Отримані значення свідчать, що висушена пивна дробина може розглядатися як багатокомпонентна зернова сировина. Її технологічне значення пов'язане не лише з волокнистою складовою, а й із наявністю білкових, ліпідних та мінеральних компонентів. Значний вміст білка узгоджується з літературними даними щодо складу пивної дробини, відповідно до яких його кількість істотно залежить від вихідної сировини та особливостей пивоварного процесу *(Jaeger A., Sahin A.W., Nyhan L., Zannini E., Arendt E.K, 2023; Dancker P., Glas K., Gastl M., 2025*).

Для оцінювання перспективності порошку у складі вівсяного печива важливим було його порівняння з традиційною борошняною сировиною. У досліджуваній фракції порошку розміром 300 мкм вміст білка становив 17,9 %, тоді як у пшеничному та вівсяному борошні – відповідно 11,9 і 14,2 %. Вміст клітковини становив 8,1 % порівняно з 0,1 % у пшеничному та 6,5 % у вівсяному борошні. Особливо значною була відмінність за вмістом крохмалю: 1,5 % у порошку пивної дробини проти 79,7 % у пшеничному та 49,5 % у вівсяному борошні.

Отже, часткова заміна пшеничного борошна порошком пивної дробини змінює співвідношення основних компонентів борошняної основи. Зменшення частки крохмалю поєднується зі збільшенням кількості волокнистих і білкових речовин. Така трансформація рецептурної композиції відповідає поставленому завданню − підвищенню вмісту харчових волокон у готовому продукті.

Поряд із хімічним складом важливим показником технологічної придатності порошку є його дисперсність. Розмір частинок визначає площу контакту з іншими рецептурними компонентами, характер гідратації та рівномірність розподілу сировини у тісті. Для борошняних кондитерських виробів він також безпосередньо впливає на сенсорне сприйняття структури готового продукту.

У досліджуваній сировині встановлено широкий діапазон розмірів частинок. Для порошку пивної дробини він становив від 50 до 450 мкм, що свідчить про його більш грубодисперсний і неоднорідний характер порівняно з традиційним борошном.

Важливо, що окремі фракції відрізнялися не лише розміром, а й співвідношенням білкових і волокнистих складових. Результати попередньо опублікованого дослідження наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Вміст білка та клітковини у фракціях порошку пивної дробини

Розмір частинок, мкм	Білок, %	Клітковина, %
50	30,21±0,47	1,64±0,40
200	15,63±0,27	3,17±0,40
300	17,93±0,30	8,06±0,40
450	17,68±0,30	9,73±0,40

Джерело: складено за даними (Синенко Т., Юрченко В., 2024).

Зі збільшенням розміру частинок спостерігалася тенденція до підвищення масової частки клітковини. Її вміст зростав від 1,64 % у фракції 50 мкм до 9,73 % у фракції 450 мкм. Водночас найбільший вміст білка встановлено в

найдрібнішій фракції – 30,21 %. У фракціях 300 та 450 мкм цей показник становив відповідно 17,93 і 17,68 % *(Синенко Т., Юрченко В., 2024).*

Таке розподілення компонентів може бути пов'язане з морфологічною неоднорідністю залишкових тканин зернівки. Більші частинки можуть містити більшу частку оболонкових структур, тоді як дрібніші фракції − компоненти внутрішніх тканин зерна. Водночас наявні результати підтверджують лише сам факт відмінностей між фракціями; детальне морфологічне пояснення потребувало б окремого структурного дослідження.

Вибір фракції для рецептури не може ґрунтуватися лише на максимальному вмісті клітковини. Збільшення розміру частинок може негативно впливати на однорідність тіста та сенсорне сприйняття готового виробу. Тому було проведено оцінювання модельних зразків печива з порошком з дисперсністю 50, 200, 300 та 450 мкм.

Рис. 2.1. Зовнішній вигляд готових виробів печива вівсяного з пивною дробиною з розміром фракцій:

а – контрольний зразок, б – 50 мкм, в – 200 мкм, г – 300 мкм, д – 450 мкм

Джерело: власні дослідження

За результатами оцінювання встановлено, що використання частинок розміром 450 мкм погіршувало зовнішній вигляд, структуру, смак і запах виробів. Зразки з порошком дисперсністю 50–300 мкм характеризувалися більш прийнятними сенсорними властивостями. За сукупністю показників для подальших досліджень було обрано фракцію 300 мкм.

Вибір зазначеної фракції забезпечував компроміс між волокнистим потенціалом сировини та сенсорною прийнятністю продукту. За розміру частинок 300 мкм вміст клітковини становив 8,06 %, а білка – 17,93 %. Водночас відсутній негативний сенсорний ефект, характерний для фракції 450 мкм.

Подібна залежність технологічних і сенсорних властивостей печива від гранулометричних характеристик зернової сировини встановлена науковцями *Nguyen Q. C., Castura J. C., Nguyen D. D. L., Varela P., 2023).* Автори пов'язують розмір частинок зі змінами твердості, щільності, жувальності та загального сенсорного сприйняття продукту.

Після вибору раціональної дисперсності важливим етапом стало визначення здатності порошку взаємодіяти з водною та жировою фазами рецептурної системи. Для дослідження використовували порошок пивної дробини фракції 300 мкм, а порівняльним зразком було пшеничне борошно вищого ґатунку.

Таблиця 2.3

Функціонально-технологічні показники пшеничного борошна та порошку пивної дробини

Показник	Пшеничне борошно, %	Порошок пивної дробини, %
Вологопоглинальна здатність	150,0±2,0	195,0±2,0
Жирозв'язувальна здатність	42,0±1,0	81,0±1,0

Джерело: власні дослідження

Вологопоглинальна здатність порошку пивної дробини становила 195 %, тоді як для пшеничного борошна − 150 %. Отже, абсолютна різниця становила 45 відсоткових пунктів, а відносне збільшення – 30 %.

Жирозв'язувальна здатність порошку становила 81 % порівняно з 42 % для пшеничного борошна. Різниця становила 39 відсоткових пунктів, а відносне збільшення – приблизно 92,9 %.

Підвищену здатність порошку зв'язувати воду можна пояснити значною кількістю харчових волокон і білкових речовин. Гідрофільні групи структурних полісахаридів здатні утворювати зв'язки з молекулами води. Додаткове її утримання забезпечується капілярною та пористою структурою рослинних частинок.

Значна водозв'язувальна здатність має безпосереднє технологічне значення. Під час введення порошку пивної дробини частина води, яка в традиційній рецептурі використовується для гідратації борошняних компонентів, зв’язується волокнистою фракцією. Внаслідок цього можуть змінюватися консистенція та пластичність тіста.

Не менш важливою є здатність порошку взаємодіяти з жировою фазою. Печиво належить до виробів, у структуроутворенні яких жир відіграє суттєву роль. Він впливає на пластичність тіста, обмежує надмірний розвиток білкової структури та бере участь у формуванні розсипчастості готової продукції.

Здатність волокнистої добавки утримувати частину жирової фази може змінювати характер її розподілу в тісті. Тому високий показник жирозв'язувальної здатності порошку необхідно враховувати під час встановлення його раціональної концентрації.

Отримані закономірності узгоджуються з сучасними уявленнями про функціональні властивості пивної дробини. Дослідники *Naibaho J., Pudło A., Bobak Ł., Wojdyło A., Alemany López Á., Pangestika L., Andayani S., Korzeniowska M., Yang B. (2024)* наголошують, що волого- та жироутримувальна здатність є

однією з ключових характеристик, яка визначає можливість використання пивної дробини як харчового інгредієнта.

Водночас значення цих показників можуть суттєво відрізнятися залежно від складу сировини, способу сушіння, ступеня подрібнення та технологічних модифікацій. Тому експериментальне визначення функціональних властивостей конкретного порошку є необхідною складовою розроблення рецептури.

Практична можливість застосування порошку пивної дробини підтверджена результатами його використання у різних групах борошняної продукції. Наукові дослідження останніх років охоплюють хліб, печиво, бісквіти, мафіни, кекси, снеки та інші вироби (*Oyedeji A. B., Wu J., 2023*; *Naibaho J., Pudło A., Bobak Ł., Wojdyło A., Alemany López Á., Pangestika L., Andayani S., Korzeniowska M., Yang B., 2024).*

Особливо важливими для обґрунтування подальших досліджень є результати використання порошку пивної дробини саме у борошняних кондитерських виробах.

Науковці *Синенко Т. та Юрченко В. (2024)* досліджували можливість його застосування у технології кексів. У модельних композиціях поступово збільшували частку порошку та оцінювали зміни властивостей готової продукції. Встановлено, що внесення 10–30 % порошку забезпечувало формування приємних смако-ароматичних характеристик із горіхово-карамельними відтінками. Подальше збільшення концентрації призводило до посилення специфічних характеристик пивної дробини. На основі проведеної оптимізації авторами розроблено кекс із порошком пивної дробини. У рецептурі частка порошку становила 40 % від маси борошняних компонентів. Співвідношення пшеничного борошна та порошку пивної дробини становило 60:40 *(Синенко Т., Юрченко В., 2024)*. Ці результати є важливими для підтвердження принципової можливості використання значної кількості пивної дробини у борошняній кондитерській системі. Водночас їх не можна

безпосередньо переносити на технологію вівсяного печива. Кекси та печиво суттєво відрізняються за рецептурним складом, вологістю тіста, механізмами структуроутворення та умовами теплової обробки. Тому концентрацію функціонального інгредієнта слід визначати окремо для кожної групи продукції.

Аналогічні висновки випливають із міжнародних досліджень. *Wang X., Xu Y., Teo S. Q., Heng C. W., Lee D. P. S., Gan A. X., Kim J. E.(2023)* встановили можливість використання ферментованої пивної дробини у технології печива. Збільшення її концентрації покращувало окремі показники нутрієнтного складу, проте водночас впливало на фізичні та сенсорні властивості. Печиво з 15 % добавкою за загальною прийнятністю було порівнянне з контрольним зразком.

У дослідженні також підтверджено можливість суттєвого підвищення вмісту харчових волокон у печиві за рахунок пивної дробини. За максимального рівня заміни борошна кількість харчових волокон збільшувалася з 6,37 до 15,54 %. Однак одночасно твердість виробів зростала приблизно від 40 до 97 N. Це ще раз підтверджує необхідність узгодження нутрієнтного збагачення із текстурними характеристиками продукту *(Nicolai M., Palma M., Reis R., Amaro R., Fernandes J., Gonçalves E. M., Silva M., Lageiro M., Charmier A., Maurício E., Branco P., Palma C., Silva J., Nunes M. C., Fernandes P. C. B., Pereira P., 2025).*

Таким чином, літературні та експериментальні дані демонструють спільну закономірність: збільшення концентрації пивної дробини дозволяє підвищувати вміст харчових волокон, однак надмірне її дозування може негативно впливати на структуру та сенсорну прийнятність виробів.

Саме тому наступним етапом стало визначення раціональної концентрації порошку пивної дробини безпосередньо у рецептурній композиції вівсяного печива.

Для визначення оптимального рівня заміни традиційної борошняної сировини було сформовано модельні рецептурні композиції вівсяного печива. Порошок пивної дробини фракції 300 мкм вводили у кількості 10 (К2), 20 (К3) та 30 % (К4) від загальної маси борошняної суміші шляхом відповідного зменшення кількості пшеничного борошна. Контрольний зразок виготовляли без внесення порошку (К1).

Такий підхід дозволив оцінити ефект поступового збільшення концентрації волокнистої сировини. Важливо, що вівсяне борошно у модельних композиціях залишалося постійним компонентом. Це дозволило пов’язувати основні зміни властивостей системи саме зі збільшенням кількості пивної дробини.

Під час формування тіста було відзначено поступове збільшення видимості частинок порошку. Більші частинки сильніше проявлялися у структурі модельних композицій. Одночасно посилювалося темніше забарвлення тіста, пов'язане з природним кольором пивної дробини.

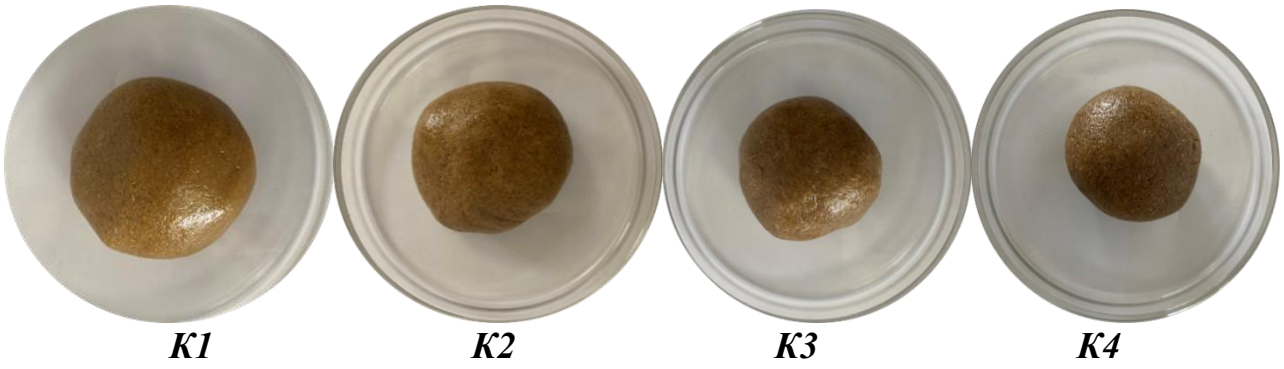

Рис. 2.2. Зовнішній вигляд модельних тістових композицій вівсяного печива з пивною дробиною

Рис. 2.3. Зовнішній вигляд готових виробів печива вівсяного з пивною дробиною

Джерело: власні дослідження

Зміна кольору під час введення пивної дробини є закономірною та підтверджується іншими дослідниками. Пігментовані оболонкові компоненти та продукти попередньої термічної обробки солоду формують темніше забарвлення сировини порівняно з пшеничним борошном. Під час випікання ця різниця може додатково посилюватися внаслідок неферментативних реакцій потемніння.

Проведене комплексне оцінювання показало технологічну доцільність використання порошку пивної дробини в діапазоні 10–20 % від маси борошняної суміші. За результатами оптимізації для подальшого розроблення продукту було обрано концентрацію 20 % (К3).

При цьому рекомендоване співвідношення основних борошняних компонентів становило: пшеничне борошно : вівсяне борошно : порошок пивної дробини = 2,56 : 1,44 : 1,00.

Отриманий результат добре узгоджується із загальною тенденцією, встановленою іншими авторами. Для печива найбільш прийнятними часто виявляються помірні рівні заміни традиційного борошна. Водночас максимально допустима концентрація залежить від рецептурної матриці, попередньої обробки пивної дробини та необхідних характеристик готового продукту (*Wang X., Xu Y., Teo S. Q., Heng C. W., Lee D. P. S., Gan A. X., Kim J. E, 2023*; *Naibaho J., Pudło A., Bobak Ł., Wojdyło A., Alemany López Á., Pangestika L.,*

Andayani S., Korzeniowska M., Yang B., 2024; *Nicolai M., Palma M., Reis R., Amaro R., Fernandes J., Gonçalves E. M., Silva M., Lageiro M., Charmier A., Maurício E., Branco P., Palma C., Silva J., Nunes M. C., Fernandes P. C. B., Pereira P., 2025).*

Порівняння з результатами Синенко Т. та Юрченко В. (2024) додатково підтверджує продуктоспецифічний характер оптимальної концентрації. Для кексів автори обґрунтували можливість використання 40 % порошку від маси борошняної сировини. Для досліджуваного вівсяного печива раціональною визначено концентрацію 20 %. Отже, технологічна система печива виявилася чутливішою до збільшення кількості волокнистої сировини.

Ця відмінність може бути пов'язана з особливостями формування структури двох видів кондитерських виробів. Кексове тісто характеризується вищою вологістю та значною часткою жирової і яєчної сировини. Це створює ширші можливості для гідратації волокнистого компонента. Для печива кількість вільної вологи є меншою, тому висока вологозв'язувальна здатність порошку сильніше впливає на консистенцію системи.

Отримані результати дозволили обґрунтувати основні технологічні параметри використання порошку пивної дробини у вівсяному печиві: розмір частинок – 300 мкм; концентрація – 20 % від маси борошняної суміші; спосіб введення – часткова заміна пшеничного борошна. Саме ці параметри були покладені в основу розроблення рецептури вівсяного печива «Сумчанка».

Таким чином, проведене обґрунтування підтвердило доцільність використання порошку пивної дробини як функціонального компонента вівсяного печива. Порошок характеризується значним вмістом харчових волокон і білка та вираженими волого- і жирозв'язувальними властивостями. Встановлено суттєву залежність його технологічної придатності від дисперсності. Збільшення розміру частинок супроводжується підвищенням частки клітковини, однак надмірно великі частинки погіршують сенсорні властивості виробів. За комплексом нутрієнтних, функціонально-технологічних та сенсорних критеріїв раціональною визначено фракцію 300 мкм.

Встановлення концентрації порошку також підтвердило необхідність комплексного підходу до рецептурної оптимізації. Підвищення його кількості створює передумови для збільшення вмісту харчових волокон, але водночас посилює вплив на структуроутворення. Для досліджуваної системи оптимальним визначено внесення 20 % порошку пивної дробини від маси борошняної суміші. Це стало основою для наступного етапу – розроблення рецептури, технологічної схеми та комплексного оцінювання якості вівсяного печива з підвищеним вмістом харчових волокон.

3. Розроблення технології вівсяного печива з підвищеним вмістом харчових волокон.

На підставі результатів попереднього етапу досліджень для розроблення вівсяного печива було обрано порошок пивної дробини дисперсністю 300 мкм. Раціональна концентрація інгредієнта становила 20 % від загальної маси борошняної суміші. За такого дозування забезпечувалося прийнятне поєднання нутрієнтних, функціонально-технологічних і сенсорних властивостей рецептурної системи.

Подальший етап дослідження передбачав формування рецептурного складу виробу, встановлення послідовності технологічних операцій та обґрунтування основних параметрів технологічного процесу. Розроблений продукт отримав назву вівсяне печиво «Сумчанка».

Рецептурну композицію формували шляхом часткової заміни пшеничного борошна порошком пивної дробини. Вівсяне борошно залишалося постійною складовою борошняної основи. Такий принцип побудови рецептури дозволив зберегти характерні властивості вівсяного печива та одночасно підвищити частку вторинної зернової сировини.

На 100 кг борошняної суміші використовували 51,25 кг пшеничного борошна вищого ґатунку, 28,75 кг вівсяного борошна та 20,00 кг порошку пивної дробини. Співвідношення зазначених компонентів становило приблизно 2,56 : 1,44 : 1,00.

Таблиця 3.1

Рецептурний склад вівсяного печива «Сумчанка»

Найменування сировини	Масова частка сухих речовин, %	Витрати на 1000 кг готової продукції, кг, у натурі	Витрати на 100 кг борошняної суміші, кг, у натурі
Борошно пшеничне вищого ґатунку	85,50	286,90	51,25
Борошно вівсяне	85,50	161,00	28,75
Порошок пивної дробини	91,50	112,00	20,00
Цукор білий кристалічний	99,85	321,00	57,33
Масло вершкове	84,00	164,00	29,29
Повидло яблучне	66,00	64,00	11,43
Сіль кухонна	96,50	7,00	1,25
Ванілін	99,50	0,18	0,03
Кориця	99,50	0,80	0,14
Сода харчова	99,60	6,80	1,21
Усього	–	1123,68	200,70
Вихід	–	1000,00	178,60

Рецептура побудована таким чином, що порошок пивної дробини не збільшує загальної кількості борошняних компонентів, а частково замінює пшеничне борошно. Це дозволяє цілеспрямовано модифікувати склад борошняної основи без надмірного збільшення частки сухих компонентів.

Вівсяне борошно у кількості 28,75 % від маси борошняної суміші забезпечує збереження характерного профілю вівсяного печива. Його поєднання з порошком пивної дробини формує багатокомпонентну зернову систему, що містить різні джерела білків, ліпідів та волокнистих речовин.

Важливе технологічне значення мають й інші рецептурні компоненти. Вершкове масло бере участь у формуванні пластичності тіста та розсипчастої структури готового виробу. Яблучне повидло впливає на смак, вологість і консистенцію тіста. Цукор формує не лише солодкість продукту, а й бере участь у структуроутворенні та формуванні забарвлення під час випікання. Кориця і ванілін доповнюють зерново-солодовий ароматичний профіль композиції.

Технологічний процес включав підготовку рецептурної сировини, приготування жиро-цукрової маси, замішування тіста, формування тістових заготовок, випікання, охолодження та пакування.

Порошок пивної дробини перед використанням зберігали за температури не вище 14 °С та відносної вологості повітря не більше 75 %. Сипкі компоненти піддавали просіюванню. Для порошку пивної дробини ця операція є особливо важливою, оскільки забезпечує руйнування можливих агломератів і рівномірніше розподілення волокнистих частинок у борошняній суміші.

Вершкове масло попередньо розм'якшували за температури 20–22 °С. Після цього його змішували з цукром і збивали протягом 10–15 хв. Тривалість збивання близько 15 хв забезпечувала збільшення об'єму маси у 2,5–3 рази. Механічне насичення жиро-цукрової маси повітрям створювало передумови для формування пористої та розсипчастої структури готового виробу.

До збитої маси вводили яблучне повидло, корицю, сіль і ванілін та перемішували протягом 1–2 хв. Після цього вносили попередньо підготовлену суміш пшеничного та вівсяного борошна й порошку пивної дробини.

Тривалість замішування тіста становила не більше 4 хв. Температура готового тіста підтримувалася у межах 24–26 °С, вологість – 17–18 %. Зазначені параметри є важливими для забезпечення необхідної пластичності системи та її придатності до подальшого формування.

Обмежена тривалість замішування має особливе значення для печива. Надмірна механічна дія може посилювати гідратацію білків у пшеничному борошні та сприяти формуванню більш пружної структури тіста. За наявності пивної дробини цей фактор додатково посилюється через її підвищену здатність зв'язувати воду.

Формування тістових заготовок здійснювали механізованим способом. Тісто подавали рифленими валками до формувальної насадки, після чого заготовки відсікали струною та розміщували на трафаретах. Такий спосіб

дозволяє уникнути багаторазового прокатування тіста та зменшити механічне навантаження на волокнисту рецептурну систему.

Випікання проводили протягом 10–12 хв у тунельній печі. Температура у першій зоні становила 150–180 °С, у другій – 210–230 °С. Поступове підвищення температури забезпечувало формування структури виробу, видалення частини вологи та розвиток характерного забарвлення.

Порошок пивної дробини природно впливає на колір печива. Темніший відтінок пов'язаний із забарвленням оболонкових частинок зерна та перебігом реакцій неферментативного потемніння під час випікання. За умови рівномірного забарвлення ця особливість є складовою характерного сенсорного профілю продукту.

Після випікання печиво охолоджували потоком повітря температурою 20–22 °С. Після стабілізації структури вироби направляли на пакування. Для пакування передбачалося використання паперових або полімерних пакетів, а також картонної тари. Готову продукцію зберігали у сухих, чистих та вентильованих приміщеннях за температури (18±3) °С та відносної вологості повітря не вище 75 %.

Таким чином, введення порошку пивної дробини не потребувало принципової зміни традиційної послідовності виробництва вівсяного печива. Основними технологічними особливостями стали підготовка порошку, формування комбінованої борошняної суміші та контроль параметрів короткочасного замішування тіста

Технологічна доцільність рецептурної модифікації повинна підтверджуватися не лише зміною нутрієнтного складу, а й збереженням прийнятних споживчих характеристик. Для печива ключовими показниками є форма, стан поверхні, колір, структура в розломі, смак і запах.

За результатами сенсорного оцінювання печиво «Сумчанка» характеризувалося правильною випуклою формою, шорсткуватою поверхнею з характерними тріщинами та рівномірним забарвленням від світло-коричневого

до коричневого. У розломі вироби були пропечені, без ущільнень і слідів непромісу. Смак і запах відповідали характеру випеченого вівсяного печива та доповнювалися горіхово-карамельними нотками. Сторонніх присмаків і запахів не виявлено.

Таблиця 3.2

Органолептичні показники вівсяного печива «Сумчанка»

Показник	Характеристика
Форма	Правильна, випукла, властива даному виду печива, не розпливчаста, без пошкоджень
Поверхня	Шорсткувата, з характерними тріщинами
Колір	Від світло-коричневого до коричневого, рівномірний
Вид у розломі	Пропечене, без ущільнень і слідів непромісу; нерівномірна пористість із невеликими порожнинами
Смак і запах	Властиві пропеченому печиву, з вираженим вівсяним ароматом та горіхово-карамельними нотками, без стороннього присмаку і запаху

Джерело: власні дослідження

Збереження правильної форми є важливим результатом, оскільки пивна дробина характеризується підвищеною здатністю зв'язувати воду. За концентрації 20 % зміни рецептурної системи не призвели до втрати формостійкості або до утворення виражених структурних дефектів.

Сенсорний профіль також підтвердив доцільність обраної концентрації. Горіхово-карамельні та зернові відтінки не сприймалися як сторонні, а формували характерний профіль нового продукту.

Для об'єктивного оцінювання якості печива визначали масову частку вологи, загального цукру, жиру та золи, нерозчинної у 10 %-му розчині соляної кислоти. Результати дослідження наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Фізико-хімічні показники вівсяного печива «Сумчанка»

Показник	Регламентований показник відповідно до рецептури та ДСТУ 3781:2014	«Сумчанка»
Масова частка вологи, %, не більше	8,5	8,4
Загальний цукор у перерахунку на суху речовину, %, не більше	41,5	40,2
Жир у перерахунку на суху речовину, %, не більше	21,5	10,7
Зола, нерозчинна у 10 % HCl, %, не більше	0,10	0,08

Джерело: власні дослідження

Масова частка вологи готового печива становила 8,4 %, тобто перебувала практично біля прийнятого для порівняння значення 8,5 %. Цей результат має важливе технологічне значення з огляду на високу вологопоглинальну здатність порошку пивної дробини.

З одного боку, харчові волокна здатні утримувати значну кількість води під час формування тіста. З іншого боку, після випікання необхідно забезпечити достатнє видалення надлишкової вологи для отримання характерної структури печива. Одержане значення 8,4 % свідчить, що прийняті параметри випікання забезпечували необхідний рівень зневоднення виробів.

Масова частка загального цукру в перерахунку на суху речовину становила 40,2 %; допустиме значення − не більше 41,5 %. Таким чином, використання порошку пивної дробини не вимагало збільшення кількості цукру понад рівень, передбачений рецептурою.

Масова частка жиру в перерахунку на суху речовину становила 10,7 %, що було суттєво нижче за прийняте для порівняння значення 21,5 %.

Одержане значення характеризує жирову складову саме розробленої рецептурної композиції. При цьому необхідно враховувати, що частина ліпідів надходить не лише з вершкового масла, а й із вівсяного борошна та пивного дробинного порошку.

Масова частка золи, нерозчинної у 10 %-му розчині соляної кислоти, становила 0,08 %; допустиме значення − не більше 0,1 %. Цей показник використовується для оцінювання наявності мінеральних домішок, тому отриманий результат підтверджує належну чистоту сировини та готової продукції за цим критерієм.

У сукупності досліджені фізико-хімічні характеристики підтвердили, що використання 20 % порошку пивної дробини не призводило до виходу основних контрольованих показників за межі значень, прийнятих у роботі для вівсяного печива.

Отже, поєднання пшеничного і вівсяного борошна з порошком пивної дробини дозволило сформувати продукт, який характеризувався прийнятними органолептичними та фізико-хімічними властивостями.

Основною метою введення пивної дробини в склад вівсяного печива було не лише розширення сировинної бази, а й коригування нутрієнтного складу готової продукції. Тому для оцінювання ефективності розробленої рецептури доцільно порівняти харчову цінність традиційного вівсяного печива та печива «Сумчанка».

Розрахункові показники наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Харчова та енергетична цінність вівсяного печива, на 100 г продукту

Показник	Традиційне вівсяне печиво	Печиво «Сумчанка»
Білки, г	7,5	11,1
Жири, г	11,8	13,5
Вуглеводи, г	54,4	56,2
Харчові волокна, г	1,7	3,3
Енергетична цінність, ккал	353,8	390,3

Джерело: власні дослідження

Найбільш виражена зміна встановлена за кількістю харчових волокон. Їх розрахунковий вміст збільшився з 1,7 до 3,3 г/100 г. Абсолютний приріст становив 1,6 г/100 г, а відносний – близько 94,1 %.

Вміст білка збільшився з 7,5 до 11,1 г/100 г, тобто на 3,6 г/100 г, або на 48,0 %. Підвищення білкової складової узгоджується зі складом порошку пивної дробини, який характеризується вищою часткою білка порівняно з пшеничним борошном.

Вміст жиру збільшився на 1,7 г/100 г, або приблизно 14,4 %, а загальна кількість вуглеводів – на 1,8 г/100 г, або 3,3 %. Тому рецептурна модифікація змінила не лише кількість окремих нутрієнтів, а й співвідношення складових продукту.

Енергетична цінність збільшилася з 353,8 до 390,3 ккал/100 г. Тому розроблене печиво недоцільно характеризувати як продукт зі зниженою калорійністю. Його перевага полягає в іншому – у зміні нутрієнтного профілю за рахунок майже дворазового збільшення кількості харчових волокон та суттєвого підвищення вмісту білка.

Розроблення нового харчового продукту передбачає не лише оцінювання його органолептичних і фізико-хімічних характеристик, а й підтвердження мікробіологічної безпечності. Це набуває особливого значення у разі використання вторинної рослинної сировини, оскільки її початковий стан, способи стабілізації та умови зберігання можуть впливати на мікробіологічну стабільність готового виробу.

Для пивної дробини питання стабілізації є особливо актуальним через високу вологість свіжої сировини. Саме тому перед використанням у рецептурі печива її висушували до низької залишкової вологості та переводили у порошкоподібну форму. Така попередня обробка є необхідною передумовою для подальшого безпечного використання пивної дробини в харчовій технології.

Мікробіологічне оцінювання розробленого вівсяного печива «Сумчанка» проводили за показниками загальної кількості мезофільних аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів, бактерій групи кишкових паличок, патогенних мікроорганізмів, пліснявих грибів та дріжджів. У свіжовиготовленому продукті бактерії групи кишкових паличок не виявлено. Також не виявлено патогенних мікроорганізмів, зокрема бактерій роду *Salmonella*, пліснявих грибів і дріжджів.

Таблиця 3.5

Мікробіологічні показники свіжовиготовленого вівсяного печива «Сумчанка»

Показник	Результат дослідження
Мезофільні аеробні та факультативно-анаеробні мікроорганізми, КУО/г	$0{,}2 \cdot 10^4$
Бактерії групи кишкових паличок, КУО/г	не виявлено
Патогенні мікроорганізми, зокрема *Salmonella,* КУО/г	не виявлено
Плісняві гриби, КУО/г	не виявлено
Дріжджі, КУО/г	не виявлено

Джерело: власні дослідження

Відсутність санітарно-показових і патогенних мікроорганізмів у свіжовиготовленій продукції свідчить про належну мікробіологічну якість сировини та дотримання технологічних режимів. При цьому важливу роль відіграє термічне оброблення печива. Випікання за температури, що перевищує 150 °С, супроводжується значним зниженням вегетативної мікрофлори у тістових заготовках.

Проте результати аналізу свіжовиготовленого продукту не можуть бути єдиною підставою для визначення строку його придатності. Протягом зберігання можливі зміни вологості, текстури, смаку, аромату та мікробіологічного стану. Тому термін зберігання має встановлюватися на основі комплексу показників.

Для обґрунтування строку придатності було проведено дослідження динаміки показників якості вівсяного печива. Контролювали мікробіологічні та органолептичні характеристики продукту протягом тривалого зберігання.

Для встановлення строку зберігання контролювали мікробіологічні та органолептичні характеристики протягом 70 діб. Визначення проводили через 0, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63 та 70 діб.

Результати показали поступове збільшення загальної кількості мезофільних аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів під час зберігання. При цьому протягом дослідного періоду до восьми тижнів значення показника залишалося в межах прийнятих нормативних критеріїв.

Бактерії групи кишкових паличок та патогенні мікроорганізми, зокрема *Salmonella*, у досліджуваних зразках не виявлено.

Плісняві гриби та дріжджі у початкові строки зберігання також не визначалися. Ознаки їхньої появи фіксувалися лише на пізніших етапах дослідження. Це свідчить, що мікробіологічна стабільність продукту зберігалася протягом значної частини експериментального періоду.

Однак для встановлення строку придатності принципово важливо враховувати не лише безпечність, а й збереження споживчих властивостей. Продукт може залишатися мікробіологічно допустимим, але раніше втрачати характерний смак, аромат, колір або текстуру.

Для оцінювання сенсорної стабільності контролювали форму, стан поверхні, колір, вид у розломі, смак і запах печива. Показники оцінювали за п'ятибальною шкалою.

До 28 доби форма, поверхня та колір виробів практично не змінювалися. Смак і запах також отримали максимальну оцінку. Після 35 діб було зафіксовано перші зміни смако-ароматичного профілю – оцінка знижувалася з 5 до 4 балів. Водночас зовнішній вигляд залишався стабільним.

На 42 добу суттєвого подальшого погіршення більшості характеристик не спостерігалося. Форма, поверхня та колір отримували високі оцінки, а смак і запах оцінювали на 4 бали.

На 49 добу відзначалося зниження оцінок форми та поверхні до 4 балів, виду у розломі – до 3 балів. Смак і запах при цьому залишалися на рівні 4 балів. Отже, на цьому етапі продукт ще характеризувався прийнятним комплексом споживчих властивостей, хоча вже простежувалися перші виражені ознаки їх поступового зниження.

Після 49 діб зміни ставали значнішими. На 56 добу смак і запах оцінювали вже на 3 бали. На 63–70 добу суттєво погіршувалися практично всі сенсорні характеристики. Особливо помітними були зміни поверхні, кольору, структури у розломі та смако-ароматичного профілю.

Таким чином, саме сенсорна стабільність стала одним із факторів, що обмежують строк реалізації розробленого продукту. Це важливий результат, оскільки мікробіологічна безпечність у певний період може зберігатися довше, ніж оптимальні споживчі характеристики.

Комплексне оцінювання отриманих даних дозволило встановити рекомендовані умови зберігання вівсяного печива «Сумчанка»: температура (18±3) °С, відносна вологість повітря 70–75 %, строк зберігання – не більше 49 діб. Саме такий висновок безпосередньо сформульовано за результатами експерименту зі зберігання.

Вибір 49 діб є обґрунтованим на підставі результатів одночасного контролю мікробіологічних і органолептичних показників. До цього строку продукт зберігав прийнятний сенсорний профіль, а досліджувані мікробіологічні показники не свідчили про порушення безпечності.

Після 49 діб спостерігалося більш помітне погіршення сенсорних характеристик. Тому продовження строку реалізації лише на підставі відсутності критичних мікробіологічних змін було б недостатньо обґрунтованим.

Висновки. Проведені дослідження підтвердили перспективність використання пивної дробини як вторинної зернової сировини у технології борошняних кондитерських виробів. Переведення її у форму сухого дисперсного порошку забезпечує технологічну придатність сировини та дозволяє використовувати її як додаткове джерело білкових і волокнистих компонентів.

Встановлено, що важливим чинником ефективного використання порошку є його дисперсність. За сукупністю хімічних, функціонально-технологічних і сенсорних характеристик для виробництва вівсяного печива обрано фракцію 300 мкм. Для порошку встановлено вищу порівняно з пшеничним борошном вологопоглинальну та жирозв'язувальну здатність, що необхідно враховувати під час формування рецептурної композиції та технологічних параметрів виробництва.

На основі дослідження модельних рецептур із внесенням 10–30 % порошку пивної дробини обґрунтовано його раціональну концентрацію – 20 % від маси борошняної суміші. Розроблено рецептуру вівсяного печива «Сумчанка», у якій співвідношення пшеничного борошна, вівсяного борошна та пивного дробинного порошку становить 2,56 : 1,44 : 1,00. Запропонована рецептура не потребує принципових змін у традиційній технологічній схемі виробництва печива.

Розроблене печиво характеризувалося правильною формою, рівномірним світло-коричневим або коричневим забарвленням, пропеченою структурою та вираженим вівсяним ароматом із горіхово-карамельними нотками. Масова частка вологи становила 8,4 %, загального цукру – 40,2 %, жиру – 10,7 %, золи, нерозчинної у 10 %-му розчині соляної кислоти, – 0,08 %.

Використання пивної дробини в порошковій формі дозволило цілеспрямовано змінити нутрієнтний склад продукту. Вміст білка збільшився з 7,5 до 11,1 г/100 г, а розрахунковий вміст харчових волокон – з 1,7 до 3,3 г/100 г. Водночас енергетична цінність зросла з 353,8 до 390,3 ккал/100 г. Отже,

перевага розробленої рецептури полягає в підвищенні вмісту білка та харчових волокон, а не в зниженні калорійності продукту.

За результатами комплексного оцінювання мікробіологічної та сенсорної стабільності обґрунтовано строк зберігання печива «Сумчанка» не більше 49 діб за температури (18±3) °С та відносної вологості повітря 70–75 %.

Таким чином, використання порошку пивної дробини у технології вівсяного печива забезпечує поєднання належних споживчих властивостей із підвищенням вмісту харчових волокон і білка. Запропоноване технологічне рішення також сприяє раціональному використанню вторинних ресурсів пивоварного виробництва та розширенню сировинної бази для борошняних кондитерських виробів.

References:

Czubaszek A., Wojciechowicz-Budzisz A., Spychaj R., Kawa-Rygielska J. Baking properties of flour and nutritional value of rye bread with brewer's spent grain. *LWT*. 2021. Vol. 150. Art. 111955. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111955.

Dancker P., Glas K., Gastl M. Potential utilisation methods for brewer's spent grain: a review. *International Journal of Food Science & Technology*. 2025. Vol. 60, No. 1. Art. vvae022. DOI: 10.1093/ijfood/vvae022.

Daoust L. Food reformulation and public health. *Nature Food*. 2024. Vol. 5, No. 4. P. 274. DOI: 10.1038/s43016-024-00972-5.

Delzenne N. M., Bindels L. B., Neyrinck A. M., Walter J. The gut microbiome and dietary fibres: implications in obesity, cardiometabolic diseases and cancer. *Nature Reviews Microbiology*. 2025. Vol. 23, No. 4. P. 225–238. DOI: 10.1038/s41579-024-01108-z.

Devnani B., Moran G. C., Grossmann L. Extraction, Composition, Functionality, and Utilization of Brewer's Spent Grain Protein in Food Formulations. *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 7. Art. 1543. DOI: 10.3390/foods12071543.

Jaeger A., Sahin A.W., Nyhan L., Zannini E., Arendt E.K. Functional Properties of Brewer's Spent Grain Protein Isolate: The Missing Piece in the Plant Protein Portfolio. *Foods.* 2023;12(4):798. DOI: 10.3390/foods12040798.

Falade E. O., Kouamé K. J. E.-P., Zhu Y., Zheng Y., Ye X. A review: Examining the effects of modern extraction techniques on functional and structural properties of cellulose and hemicellulose in Brewer's Spent Grain dietary fiber. *Carbohydrate Polymers*. 2025. Vol. 348, Pt. A. Art. 122883. DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.122883.

Lin S. Dietary fiber in bakery products: Source, processing, and function. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2022. Vol. 99. P. 37–100. DOI: 10.1016/bs.afnr.2021.12.001.

Naibaho J., Korzeniowska M., Lu Y., Sitanggang A. B., Julianti E. Brewers' spent grain as a food ingredient: Techno-processing properties, nutrition, acceptability, and market. *Trends in Food Science & Technology*. 2024. Vol. 152. Art. 104685. DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104685.

Naibaho J., Pudło A., Bobak Ł., Wojdyło A., Alemany López Á., Pangestika L. M. W., Andayani S. N., Korzeniowska M., Yang B. Conventional water bath heating on undried brewer's spent

grain: Functionality, fatty acids, volatiles, polyphenolic and antioxidant properties. *Food Bioscience*. 2023. Vol. 53. Art. 102523. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102523.

Nguyen Q. C., Castura J. C., Nguyen D. D. L., Varela P. Identifying temporal sensory drivers of liking of biscuit supplemented with brewer's spent grain for young consumers. *Food Research International*. 2023. Vol. 170. Art. 113049. DOI: 10.1016/j.foodres.2023.113049.

Nicolai M., Palma M. L., Reis R., Amaro R., Fernandes J., Gonçalves E. M., Silva M., Lageiro M., Charmier A., Maurício E., Branco P., Palma C., Silva J., Nunes M. C., Fernandes P. C. B., Pereira P. Assessing the Potential of Brewer's Spent Grain to Enhance Cookie Physicochemical and Nutritional Profiles. *Foods*. 2025. Vol. 14, No. 1. Art. 95. DOI: 10.3390/foods14010095.

Oyedeji A. B., Wu J. Food-based uses of brewers spent grains: Current applications and future possibilities. *Food Bioscience*. 2023. Vol. 54. Art. 102774. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102774.

Sanches M. A. R., Augusto P. E. D., Polachini T. C., Telis-Romero J. Water sorption properties of brewer's spent grain: A study aimed at its stabilization for further conversion into value-added products. *Biomass and Bioenergy*. 2023. Vol. 170. Art. 106718. DOI: 10.1016/j.biombioe.2023.106718.

Wang X., Xu Y., Teo S. Q., Heng C. W., Lee D. P. S., Gan A. X., Kim J. E. Impact of solid-state fermented Brewer's spent grains incorporation in biscuits on nutritional, physical and sensorial properties. *LWT*. 2023. Vol. 182. Art. 114840. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114840.

World Health Organization. *Carbohydrate intake for adults and children: WHO guideline*. Geneva : World Health Organization, 2023. 100 p. ISBN 978-92-4-007359-3. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240073593.

Yilmaz M. S., Şakiyan Ö. Novel Drying Methods for Sustainable Upcycling of Brewers' Spent Grain as a Functional Ingredient in Bakery Products. *Journal of Food Process Engineering*. 2026. Vol. 49, No. 5. Art. e70572. DOI: 10.1111/jfpe.70572.

Синенко Т. П., Юрченко В. Ю. Розробка технології кексів з підвищеною біологічною та харчовою цінністю. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Т. 14, № 2. DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-22.

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-221
UDC 37.091.3:004.8:811:355.23

CHAPTER 7.
DIGITAL TECHNOLOGIES AND GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DEVELOPING FOREIGN LANGUAGE COMMUNICATIVE COMPETENCE OF MILITARY EDUCATION LEARNERS

Nataliia DEMCHENKO
PhD, Associate Professor of the Department of
Foreign Languages, Kruty Heroes Military Institute of
Telecommunications and Information Technology,
(Kyiv, 45/1 Knyaziv Ostrozkykh Street)
demchaneta@ukr.net
https://orcid.org/0000-0001-5915-0087

Abstract. This study examines current trends in the digital transformation of foreign language education and their impact on the training of future officers. It analyzes the conceptual foundations of digitizing the educational process, international approaches to developing digital education, and the specific aspects of developing digital competence in both instructors and students. The didactic potential of digital technologies for developing foreign language communicative competence is explored, particularly the possibilities offered by digital learning environments, blended and mobile learning, interactive platforms, digital simulations, and formative assessment. Generative artificial intelligence is examined as a new stage in the development of digital educational technologies and as a means of personalizing foreign language instruction. Based on a comparative analysis, the didactic potential of large language models (ChatGPT, Claude, Gemini, Microsoft Copilot) is summarized in terms of their use in developing foreign language communicative competence among future officers.

The study presents an original synthesis of the evolution of the pedagogical roles of generative AI in the educational process, reflecting its transformation from a digital assistant to a personalized digital mentor. The main challenges associated with the use of generative AI - related to academic integrity, the reliability of generated information, information security, digital ethics, and copyright compliance—are identified. The paper justifies the need for pedagogically sound integration of AI into the educational process while adhering to the principles of a human-centered approach.

Keywords: transformation of education, communicative competence, personalized learning, language models, Artificial Intelligence, foreign language training, student-centered learning.

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ГЕНЕРАТИВНИЙ ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ФОРМУВАННІ ІНШОМОВНОЇ КОМУНІКАТИВНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ЗДОБУВАЧІВ ВІЙСЬКОВОЇ ОСВІТИ

Анотація. Досліджено сучасні тенденції цифрової трансформації іншомовної освіти та їхній вплив на підготовку майбутніх офіцерів. Проаналізовано концептуальні засади цифровізації освітнього процесу, міжнародні підходи до розвитку цифрової освіти, а також особливості формування цифрової компетентності викладача і здобувача освіти. Розкрито дидактичний потенціал цифрових технологій у формуванні іншомовної комунікативної компетентності, зокрема, можливості цифрового освітнього середовища, змішаного та мобільного навчання, інтерактивних платформ, цифрових симуляцій і формувального оцінювання. Розглянуто генеративний штучний інтелект як новий етап розвитку цифрових освітніх технологій та його роль у персоналізації іншомовної підготовки. На основі порівняльного аналізу узагальнено дидактичний потенціал сучасних великих мовних моделей (ChatGPT, Claude, Gemini, Microsoft Copilot) щодо їх використання у формуванні іншомовної комунікативної компетентності майбутніх офіцерів. Запропоновано авторське узагальнення еволюції педагогічних ролей генеративного штучного інтелекту в освітньому процесі, що відображає його трансформацію від цифрового помічника до персоналізованого цифрового наставника. Визначено основні виклики використання генеративного ШІ, пов'язані з академічною доброчесністю, достовірністю згенерованої інформації, інформаційною безпекою, цифровою етикою та дотриманням авторського права. Обґрунтовано необхідність педагогічно доцільної інтеграції генеративного ШІ в освітній процес із дотриманням принципів людиноцентричного підходу.

Ключові слова: трансформація освіти, комунікативна компетентність, персоналізоване навчання, мовні моделі, штучний інтелект, іншомовна підготовка, студентоцентроване навчання.

Вступ. У сучасних умовах цифрової трансформації суспільства система вищої освіти зазнає суттєвих змін, пов'язаних із широким впровадженням інформаційно-комунікаційних технологій, цифрових освітніх платформ, хмарних сервісів та інструментів штучного інтелекту. Особливої актуальності ці процеси набувають у сфері професійної підготовки майбутніх офіцерів, де рівень іншомовної комунікативної компетентності є важливою складовою професійної готовності до виконання службових обов'язків, міжнародної взаємодії та професійного розвитку.

Цифровізація освіти вже не обмежується використанням окремих електронних ресурсів або дистанційних технологій навчання. Сучасний освітній простір формується як інтегроване цифрове середовище, що забезпечує персоналізацію навчання, безперервний доступ до освітнього контенту, можливість оперативного зворотного зв'язку, адаптивність навчального процесу та розвиток навичок самостійного навчання. У таких умовах цифрові технології стають не лише допоміжним засобом організації освітнього процесу, а й важливим чинником формування професійних компетентностей.

Новий етап розвитку цифрової освіти пов'язаний із появою генеративного штучного інтелекту, який відкриває принципово нові можливості для іншомовної підготовки. Генеративні мовні моделі здатні виступати інтелектуальними навчальними помічниками, генерувати автентичні навчальні матеріали, моделювати професійні комунікативні ситуації, забезпечувати індивідуалізований зворотний зв'язок та підтримувати розвиток усіх видів мовленнєвої діяльності. Одночасно використання таких технологій актуалізує низку педагогічних викликів, пов'язаних із забезпеченням академічної доброчесності, розвитком критичного мислення, цифрової грамотності та формуванням навичок відповідального використання штучного інтелекту.

Особливого значення зазначені питання набувають у системі військової освіти, яка характеризується високими вимогами до якості професійної підготовки, необхідністю швидкого оновлення знань, інтеграцією міжнародного досвіду та використанням сучасних цифрових інструментів навчання. Це зумовлює необхідність наукового осмислення потенціалу цифрових технологій і генеративного штучного інтелекту як засобів формування іншомовної комунікативної компетентності майбутніх офіцерів.

1. Цифрова трансформація іншомовної освіти: сучасні тенденції та педагогічні передумови.

На початку XXI століття цифровізація стала одним із ключових чинників суспільного розвитку, суттєво впливаючи на економіку, державне управління, сферу безпеки та систему освіти. Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій, поширення мережевої взаємодії, хмарних сервісів, мобільних платформ та інструментів штучного інтелекту зумовили переосмислення традиційних підходів до організації освітнього процесу. У сучасній педагогічній науці цифровізація розглядається не як механічне впровадження цифрових засобів у навчання, а як комплексна трансформація освітнього середовища, що охоплює зміну педагогічних моделей, ролей учасників освітнього процесу, механізмів взаємодії, способів оцінювання результатів навчання та управління освітньою діяльністю.

Особливої актуальності зазначені процеси набувають у сфері іншомовної освіти, яка традиційно характеризується високою динамічністю розвитку методичних підходів та швидкою інтеграцією інноваційних технологій. Якщо на початкових етапах цифровізація навчання іноземних мов асоціювалася переважно із застосуванням мультимедійних засобів або електронних підручників, то сучасний етап розвитку характеризується формуванням цілісного цифрового освітнього середовища, яке забезпечує інтерактивність навчання, адаптивність освітнього контенту, персоналізацію навчальних траєкторій та постійну комунікацію між усіма учасниками освітнього процесу.

У науковій літературі поняття цифрової трансформації освіти трактується значно ширше, ніж поняття цифровізації. Цифровізація передбачає використання цифрових технологій як інструменту підтримки навчального процесу, тоді як цифрова трансформація означає системні зміни всієї освітньої екосистеми, що охоплюють зміст освіти, педагогічні технології, організацію навчання, професійну діяльність викладача, освітню політику та механізми управління закладами освіти. Саме тому сучасні дослідники дедалі частіше

розглядають цифрову трансформацію як один із стратегічних напрямів модернізації освіти, спрямований на формування компетентностей, необхідних для життя та професійної діяльності в цифровому суспільстві *(Allouche E., 2024).*

Важливим концептуальним підґрунтям розвитку сучасної освіти стала концепція Digital Education, яка останніми роками активно формується на міжнародному рівні. В офіційних документах Європейської Комісії цифрова освіта визначається як використання цифрових технологій, цифрового контенту та цифрових сервісів для підтримки процесів навчання, викладання й оцінювання, а також для розвитку цифрових компетентностей усіх учасників освітнього процесу. При цьому наголошується, що цифрова освіта не повинна зводитися виключно до використання електронних ресурсів, а має забезпечувати якісно нові можливості для персоналізації навчання, розвитку співпраці, академічної мобільності, доступності освіти та формування навичок безперервного навчання.

Одним із ключових міжнародних документів, що визначає сучасну політику цифрової освіти, є Digital Education Action Plan 2021–2027, ухвалений Європейською Комісією. Документ визначає стратегічне бачення розвитку цифрової освіти в країнах Європейського Союзу та передбачає реалізацію двох взаємопов'язаних пріоритетів: формування високоефективної екосистеми цифрової освіти та розвиток цифрових навичок і компетентностей усіх учасників освітнього процесу. Особлива увага приділяється модернізації цифрової інфраструктури, забезпеченню доступності цифрових ресурсів, розвитку професійної компетентності педагогічних працівників, інтеграції технологій штучного інтелекту, використанню аналітики навчальних даних та створенню безпечного цифрового освітнього середовища.

Аналіз положень зазначеної стратегії свідчить, що сучасна європейська освітня політика поступово переходить від моделі технологічного забезпечення освіти до моделі педагогічно обґрунтованої цифрової трансформації. Якщо

перші програми цифровізації були спрямовані переважно на оснащення закладів освіти комп'ютерною технікою та забезпечення доступу до мережі Інтернет, то сучасні ініціативи орієнтовані насамперед на підвищення якості навчання шляхом інтеграції цифрових технологій у педагогічний дизайн освітнього процесу. Таким чином, цифрові інструменти розглядаються не як самоціль, а як засіб підвищення ефективності навчання, розвитку автономності здобувачів освіти, формування критичного мислення та індивідуалізації освітніх траєкторій *(European Commission, 2026).*

Аналогічний підхід простежується у стратегічних документах UNESCO, де цифрові технології визначаються як інструмент забезпечення доступної, інклюзивної та якісної освіти. Організація наголошує, що цифрова трансформація має здійснюватися відповідно до принципів людиноцентризму, педагогічної доцільності, етичності та рівності доступу. Особливий акцент робиться на необхідності розвитку цифрової грамотності, інформаційної культури, критичного мислення та відповідального використання штучного інтелекту як викладачами, так і здобувачами освіти. Генеративний штучний інтелект розглядається як перспективний інструмент підтримки навчання, однак його впровадження має супроводжуватися розробленням чітких етичних норм, механізмів академічної доброчесності та відповідною підготовкою педагогічних кадрів.

Важливим напрямом сучасної освітньої політики є також діяльність Організації економічного співробітництва та розвитку (OECD), яка пов'язує цифрову трансформацію освіти з розвитком навичок XXI ст. У документах OECD наголошується, що сучасна система освіти повинна забезпечувати не лише засвоєння предметних знань, а й формування здатності працювати з інформацією, критично оцінювати цифровий контент, ефективно співпрацювати в цифровому середовищі, швидко адаптуватися до технологічних змін та здійснювати безперервний професійний розвиток. У цьому контексті цифрові технології розглядаються як каталізатор переходу від

репродуктивної моделі навчання до моделі активного конструювання знань, у якій здобувач освіти стає повноправним суб'єктом освітнього процесу.

Для іншомовної освіти зазначені тенденції мають особливе значення. Сучасні цифрові технології значно розширили можливості формування іншомовної комунікативної компетентності завдяки використанню автентичних мультимедійних матеріалів, інтерактивних платформ, міжнародних комунікаційних проєктів, віртуальних навчальних середовищ та цифрових засобів спільної роботи. На відміну від традиційної моделі навчання, цифрове освітнє середовище забезпечує постійний доступ до автентичного мовного контенту, дозволяє моделювати реальні комунікативні ситуації, організовувати синхронну та асинхронну взаємодію між учасниками навчального процесу, здійснювати безперервний моніторинг навчальних досягнень та адаптувати освітній контент до індивідуальних потреб кожного здобувача освіти. Саме тому цифрова трансформація іншомовної освіти сьогодні розглядається як одна з необхідних умов формування конкурентоспроможного фахівця, здатного ефективно функціонувати у глобальному професійному середовищі.

Переосмислення ролі цифрових технологій у сучасній освіті закономірно актуалізувало проблему розвитку цифрової компетентності всіх учасників освітнього процесу. Якщо на початкових етапах цифровізації основна увага приділялася забезпеченню закладів освіти технічними ресурсами та доступом до інформаційно-комунікаційної інфраструктури, то сучасний етап розвитку цифрової освіти характеризується переходом до компетентнісного підходу, відповідно до якого ефективність використання цифрових технологій визначається не кількістю впроваджених цифрових інструментів, а рівнем сформованості цифрових компетентностей педагогічних працівників і здобувачів освіти.

У міжнародному освітньому просторі цифрова компетентність розглядається як одна з ключових компетентностей XXI ст. Відповідно до DigCompEdu *(Redecker C., 2017),* цифрова компетентність викладача охоплює

не лише здатність використовувати цифрові технології у професійній діяльності, а й уміння інтегрувати їх у процес навчання, організовувати цифрову взаємодію, здійснювати оцінювання за допомогою цифрових інструментів, забезпечувати інклюзивність освітнього середовища та сприяти розвитку цифрової компетентності здобувачів освіти. Отже, цифрова компетентність сучасного викладача виходить далеко за межі технологічної грамотності, перетворюючись на інтегральну характеристику його професійної діяльності.

Зазначений підхід знайшов подальший розвиток у сучасних дослідженнях, де цифрова компетентність трактується як багатовимірна система знань, умінь, практичного досвіду та професійних установок, що забезпечують ефективне використання цифрових технологій для досягнення освітніх цілей. Рівень цифрової компетентності викладача визначає не лише успішність інтеграції цифрових технологій у навчальний процес, а й готовність до педагогічних інновацій, використання адаптивних освітніх середовищ, цифрових платформ та технологій штучного інтелекту *(Rubio-Gragera M. et. al., 2023).*

Особливого значення проблема цифрової компетентності набуває у сфері іншомовної освіти. На відміну від багатьох інших навчальних дисциплін, процес формування іншомовної комунікативної компетентності передбачає постійну взаємодію, використання автентичних джерел інформації, організацію міжкультурної комунікації, моделювання професійних ситуацій спілкування та оперативний зворотний зв'язок. Саме тому цифрові технології виступають не допоміжним засобом навчання, а органічним компонентом сучасного іншомовного освітнього середовища. Відповідно, цифрова компетентність викладача іноземної мови включає здатність здійснювати педагогічний відбір цифрових ресурсів, проєктувати інтерактивні навчальні завдання, використовувати цифрові платформи для розвитку різних видів мовленнєвої діяльності, аналізувати результати навчання та забезпечувати персоналізований

супровід кожного здобувача освіти. Водночас цифрова трансформація освіти змінює не лише професійну діяльність викладача, а й сутність навчальної діяльності здобувача освіти. У сучасних міжнародних документах цифрова компетентність здобувача освіти визначається як здатність упевнено, критично, безпечно та відповідально використовувати цифрові технології для навчання, професійної діяльності й соціальної взаємодії *(European Commission, 2022).* Вона передбачає розвиток інформаційної грамотності, критичного оцінювання цифрового контенту, цифрової комунікації, створення власного цифрового продукту, дотримання принципів академічної доброчесності та безпечної поведінки у цифровому середовищі.

У цьому контексті принципового значення набуває концепція навчання, орієнтованого на здобувача освіти (студентоцентроване навчання, (Student-Centred Learning, SCL), яка протягом останніх десятиліть стала однією з базових педагогічних парадигм європейського освітнього простору. На відміну від традиційної моделі, у якій викладач виступає основним джерелом знань, студентоцентроване навчання передбачає активну участь здобувача освіти у конструюванні власного освітнього досвіду, самостійному прийнятті навчальних рішень, постановці індивідуальних цілей, рефлексії та оцінюванні власних результатів навчання *(O'Neill G., McMahon T., 2005).*

Поширення цифрових технологій значно посилило практичну реалізацію цієї концепції. Сучасні цифрові освітні платформи, системи управління навчанням, адаптивні курси, мобільні застосунки та інтелектуальні навчальні сервіси забезпечують здобувачам освіти можливість самостійно обирати темп навчання, траєкторію опрацювання матеріалу, рівень складності завдань, форми взаємодії та способи отримання зворотного зв'язку. У результаті змінюється сама логіка організації освітнього процесу: навчання дедалі більше набуває ознак індивідуалізованої діяльності, у центрі якої перебувають потреби, освітній досвід, навчальна мотивація та професійні цілі конкретного здобувача освіти. Водночас сучасні дослідники зазначають, що реалізація

студентоцентрованого підходу в цифровому середовищі дедалі більше пов'язується із застосуванням інтелектуальних освітніх технологій, здатних аналізувати навчальні досягнення, адаптувати навчальний контент до індивідуальних потреб здобувачів освіти та забезпечувати персоналізований зворотний зв'язок. Таким чином, цифрові технології поступово трансформуються з інструментів підтримки навчання у засоби проєктування індивідуальних освітніх траєкторій *(Cukurova M. A., 2026; Cukurova M. et. al., 2024).*

Зміна освітньої парадигми закономірно трансформує й професійну роль викладача. Якщо традиційна модель передбачала переважно трансляцію знань, то сучасний викладач дедалі частіше виконує функції фасилітатора, консультанта, наставника та організатора освітнього середовища. Його професійна діяльність зміщується від безпосереднього передавання інформації до проєктування навчального досвіду, створення умов для активної взаємодії, розвитку автономності здобувачів освіти, підтримки їхньої навчальної мотивації та формування навичок безперервного професійного саморозвитку. Як зазначається у ICT Competency Framework for Teachers *(UNESCO, 2018)* сучасний педагог має бути не лише користувачем цифрових технологій, а й лідером цифрових змін, здатним інтегрувати інноваційні технології відповідно до педагогічних цілей та освітніх потреб здобувачів освіти .

Не менш суттєвих змін зазнає роль здобувача освіти. Він перестає бути пасивним споживачем інформації, перетворюючись на активного суб'єкта освітньої діяльності, відповідального за власний професійний розвиток. Саме здатність до самостійного пошуку інформації, критичного аналізу джерел, використання цифрових ресурсів для розв'язання навчальних завдань, рефлексії та самооцінювання стає одним із ключових показників успішності сучасного навчання. У контексті іншомовної освіти це означає розширення можливостей автономного навчання, використання автентичного мовного середовища, участі

у міжнародній цифровій комунікації та формування навичок безперервного вдосконалення іншомовної компетентності.

Логічним продовженням студентоцентрованого підходу стала концепція персоналізованого навчання, яка сьогодні розглядається як один із найважливіших напрямів розвитку цифрової освіти. Персоналізація передбачає адаптацію змісту, методів, темпу та форм навчання до індивідуальних особливостей здобувача освіти, його попереднього досвіду, навчальних досягнень, професійних інтересів і освітніх потреб. На думку дослідників, саме цифрові технології створили реальні передумови для практичної реалізації персоналізованого навчання, оскільки дозволяють оперативно аналізувати результати навчання, моделювати індивідуальні освітні траєкторії, автоматично адаптувати навчальний контент і забезпечувати постійний формувальний зворотний зв'язок *(Holmes W., Bialik M., Fadel Ch., 2019).*

Особливого розвитку персоналізоване навчання набуло завдяки використанню технологій навчальної аналітики, адаптивних цифрових платформ та генеративного штучного інтелекту, які дозволяють оперативно аналізувати індивідуальний прогрес здобувача освіти, прогнозувати можливі навчальні труднощі, автоматично добирати навчальні матеріали відповідного рівня складності та надавати персоналізовані рекомендації щодо подальшої освітньої діяльності *(Zawacki-Richter O. et. al., 2024).*

Для іншомовної підготовки майбутніх офіцерів персоналізація навчання має особливе значення. Рівень мовної підготовки вступників, їхній попередній досвід вивчення іноземної мови, навчальна мотивація, темп засвоєння матеріалу та професійні потреби суттєво відрізняються, що ускладнює використання однакових методичних підходів для всіх здобувачів освіти. Саме цифрові технології забезпечують можливість поєднання колективних форм навчання з індивідуалізованим освітнім супроводом, створюючи умови для більш гнучкого, адаптивного та результативного формування іншомовної комунікативної компетентності. Отже, сучасний етап цифрової трансформації

освіти характеризується переходом від використання цифрових технологій як допоміжних засобів навчання до їх інтеграції як невід'ємного компонента педагогічної системи. У цих умовах цифрова компетентність викладача та здобувача освіти стає необхідною передумовою ефективної організації освітнього процесу, а студентоцентроване навчання і персоналізація навчання визначають основні напрями його подальшого розвитку. Водночас стрімкий розвиток генеративного штучного інтелекту започатковує новий етап цифрової трансформації освіти, у межах якого технології виконують не лише інформаційну чи комунікаційну функцію, а й дедалі активніше залучаються до підтримки навчальної діяльності, формувального оцінювання, індивідуального супроводу та проєктування освітнього контенту. Це зумовлює необхідність наукового осмислення дидактичного потенціалу генеративного штучного інтелекту в іншомовній підготовці майбутніх офіцерів.

2. Дидактичний потенціал цифрових технологій у формуванні іншомовної комунікативної компетентності майбутніх офіцерів.

Одним із пріоритетних завдань сучасної іншомовної освіти є формування іншомовної комунікативної компетентності, яка забезпечує здатність особистості ефективно використовувати іноземну мову в різноманітних ситуаціях професійного, академічного та міжкультурного спілкування. У сучасній педагогічній науці зазначене поняття розглядається як інтегративне утворення, що поєднує мовні знання, практичні мовленнєві вміння, соціокультурний досвід, стратегічні навички комунікації та готовність до ефективної взаємодії в іншомовному середовищі. Саме такий підхід закладено у Common European Framework of Reference for Languages (CEFR), відповідно до якого іншомовна комунікативна компетентність формується через комплексний розвиток рецептивних, продуктивних, інтерактивних та медіативних видів мовленнєвої діяльності, а також загальних і комунікативних компетентностей, необхідних для успішної соціальної та професійної взаємодії *(Council of Europe Study, 2020).*

На відміну від традиційного розуміння мовної підготовки як засвоєння лексико-граматичного матеріалу, сучасна концепція іншомовної освіти орієнтується насамперед на формування здатності застосовувати мовні знання для розв'язання реальних комунікативних завдань. Відповідно, результатом навчання стає не обсяг засвоєної інформації, а сформована готовність використовувати іноземну мову як інструмент професійної діяльності, міжкультурної взаємодії та безперервного професійного розвитку.

Особливого значення цей підхід набуває у підготовці майбутніх офіцерів, професійна діяльність яких дедалі частіше здійснюється в умовах міжнародного співробітництва, участі у багатонаціональних навчаннях, взаємодії з іноземними партнерами, опрацювання значних масивів англомовної професійної інформації та використання міжнародних інформаційних ресурсів. За таких умов іншомовна комунікативна компетентність перестає бути виключно академічним результатом навчання і перетворюється на важливий компонент професійної компетентності військового фахівця.

У сучасній науковій літературі структура іншомовної комунікативної компетентності трактується як багатокомпонентна система, елементи якої перебувають у тісному взаємозв'язку. Найбільш поширеним є підхід, відповідно до якого до її складу входять лінгвістична, соціолінгвістична, прагматична, соціокультурна та стратегічна компетентності *(Council of Europe Study, 2020).* Лінгвістична компетентність забезпечує володіння фонетичними, лексичними та граматичними засобами мови; соціолінгвістична — адекватне використання мовних засобів відповідно до ситуації спілкування; прагматична — уміння будувати зв'язне усне й писемне висловлювання відповідно до комунікативної мети; соціокультурна — розуміння культурного контексту мовлення; стратегічна — здатність компенсувати мовні труднощі, підтримувати ефективну взаємодію та використовувати різноманітні комунікативні стратегії.

Комплексний характер іншомовної комунікативної компетентності зумовлює необхідність використання таких педагогічних технологій, які

забезпечують одночасний розвиток усіх її складових. У цьому контексті цифрові технології мають суттєві дидактичні переваги порівняно з традиційними засобами навчання. Вони дозволяють інтегрувати різні види мовленнєвої діяльності в єдиному освітньому середовищі, забезпечувати постійний доступ до автентичних матеріалів, організовувати синхронну й асинхронну комунікацію, здійснювати оперативний моніторинг навчальних досягнень та адаптувати навчальний контент відповідно до індивідуальних потреб здобувачів освіти.

Дидактичний потенціал цифрових технологій значною мірою реалізується через створення цифрового освітнього середовища, яке сьогодні розглядається як інтегрована система цифрових ресурсів, інформаційно-комунікаційних технологій, електронних освітніх платформ, сервісів взаємодії та цифрових інструментів управління навчанням. На відміну від традиційного використання окремих цифрових ресурсів, сучасне цифрове освітнє середовище забезпечує цілісність навчального процесу, поєднуючи навчальний контент, комунікацію, оцінювання, самостійну роботу та освітню аналітику в єдиній цифровій екосистемі *(Zawacki-Richter O. et. al., 2019).*

Одним із базових компонентів такого середовища виступають Learning Management Systems (LMS), які стали основою цифрової організації освітнього процесу у більшості закладів вищої освіти. Використання LMS (Moodle, Canvas, Google Classroom, Blackboard та інших) забезпечує централізоване управління навчальними матеріалами, організацію самостійної роботи, підтримку синхронного й асинхронного навчання, автоматизацію оцінювання, накопичення цифрового портфоліо здобувача освіти та здійснення навчальної аналітики. Водночас сучасні системи управління навчанням дедалі частіше інтегруються із сервісами відеоконференцій, мобільними застосунками, адаптивними навчальними платформами та інструментами штучного інтелекту, що значно розширює їхній педагогічний потенціал *(Al-Fraihat D. et. al., 2020).*

У процесі іншомовної підготовки майбутніх офіцерів LMS виконують не лише організаційну функцію, а й забезпечують безперервність навчання, оперативний доступ до навчальних матеріалів, можливість багаторазового опрацювання мовного контенту, отримання індивідуального зворотного зв'язку та моніторинг власного навчального прогресу. Особливої цінності набуває можливість інтегрувати в єдиному середовищі різні види навчальної діяльності: роботу з автентичними текстами, перегляд відеоматеріалів, виконання інтерактивних вправ, участь у форумах, тестування та проєктну діяльність. Це сприяє формуванню цілісної іншомовної комунікативної компетентності, забезпечуючи взаємозв'язок усіх компонентів навчального процесу.

Важливою тенденцією розвитку сучасної іншомовної освіти стало активне поширення мобільного навчання (mobile learning), яке розширює часові та просторові межі освітнього процесу. Використання мобільних пристроїв забезпечує постійний доступ до навчального контенту незалежно від місця перебування здобувача освіти, сприяє реалізації концепції безперервного навчання (*anytime, anywhere learning*) та підвищує рівень навчальної автономії. Дослідження останніх років свідчать, що мобільне навчання позитивно впливає на розвиток словникового запасу, аудіювання, вимови та навичок усного мовлення завдяки можливості регулярного короткотривалого повторення навчального матеріалу, використанню мультимедійного контенту та інтерактивних вправ *(Kukulska-Hulme A. et. al., 2017).*

При цьому ефективність мобільного навчання визначається не самим фактом використання мобільних пристроїв, а їх педагогічно обґрунтованою інтеграцією в загальну методику навчання. Саме тому сучасні дослідники розглядають мобільне навчання як складову цифрової екосистеми іншомовної освіти, що органічно поєднується із системами управління навчанням, змішаними форматами навчання, цифровими платформами та технологіями персоналізації освітнього процесу.

Провідною тенденцією розвитку сучасної іншомовної освіти є поширення змішаного навчання (blended learning), яке розглядається як одна з найбільш ефективних моделей інтеграції цифрових технологій в освітній процес. На відміну від традиційного аудиторного чи повністю дистанційного навчання, змішане навчання ґрунтується на педагогічно обґрунтованому поєднанні різних форм організації освітньої діяльності, що забезпечує оптимальне використання переваг безпосередньої взаємодії між викладачем і здобувачами освіти та можливостей цифрового освітнього середовища. Водночас сучасні дослідники наголошують, що «blended learning» не є простим поєднанням очного й онлайн-навчання, а є новою дидактичною моделлю, у якій цифрові технології інтегруються в усі етапи освітнього процесу — від планування навчальної діяльності до оцінювання її результатів *(Graham C. R. et. al., 2019; Graham C. R., Halverson L. R., 2023).*

У контексті іншомовної підготовки майбутніх офіцерів змішане навчання створює умови для більш гнучкої організації освітнього процесу, забезпечуючи поєднання традиційних комунікативних методів навчання з цифровими ресурсами, інтерактивними вправами, мультимедійними матеріалами та онлайн-взаємодією. Такий підхід дозволяє раціонально використовувати аудиторний час для розвитку продуктивних видів мовленнєвої діяльності, насамперед усного мовлення, професійної комунікації, дискусій, рольових вправ та аналізу проблемних ситуацій, тоді як значна частина рецептивної діяльності, опрацювання теоретичного матеріалу, виконання тренувальних вправ і самоконтролю переноситься до цифрового освітнього середовища. Завдяки цьому навчальний процес набуває більшої гнучкості, а здобувачі освіти отримують можливість працювати у власному темпі, повторювати навчальний матеріал і самостійно регулювати інтенсивність навчання.

Ефективність змішаного навчання значною мірою визначається використанням принципів мікронавчання (microlearning), яке останніми роками активно інтегрується в практику іншомовної освіти. Концепція мікронавчання

передбачає структурування навчального матеріалу на короткі, змістовно завершені модулі, орієнтовані на формування окремих знань або практичних умінь. Як зазначає T. Hug *(Hug T., 2022),* мікронавчання ґрунтується на використанні коротких, сфокусованих навчальних активностей, орієнтованих на досягнення однієї конкретної навчальної мети. Сучасні дослідження Thillainadesan J. та ін.. також підтверджують, що навчальні сесії тривалістю від кількох до 15 хвилин сприяють ефективнішому засвоєнню інформації, зменшують когнітивне навантаження, підтримують навчальну мотивацію та забезпечують регулярне повторення матеріалу, що позитивно впливає на довготривале запам'ятовування *(Thillainadesan J. et. al., 2022).*

Для іншомовної підготовки майбутніх офіцерів використання мікронавчання має низку суттєвих дидактичних переваг. По-перше, воно дозволяє інтегрувати навчальну діяльність у щоденний розклад здобувачів освіти, що особливо важливо в умовах інтенсивної професійної підготовки. По-друге, короткі цифрові модулі забезпечують систематичне повторення лексичного матеріалу, граматичних конструкцій, мовленнєвих моделей і професійної термінології, запобігаючи швидкому забуванню навчального матеріалу. По-третє, мікронавчання створює передумови для реалізації принципу безперервності навчання, за якого процес формування іншомовної комунікативної компетентності не обмежується аудиторними заняттями, а продовжується у процесі самостійної роботи.

Суттєве місце у структурі цифрового освітнього середовища займають інтерактивні цифрові платформи, які забезпечують активізацію навчальної діяльності, підвищення мотивації та оперативний зворотний зв'язок. На відміну від традиційних електронних ресурсів, інтерактивні платформи передбачають безпосередню взаємодію здобувача освіти з навчальним контентом, можливість автоматизованої перевірки результатів, адаптацію рівня складності завдань та використання елементів гейміфікації. Дослідження останніх років свідчать, що використання інтерактивних платформ позитивно впливає на навчальну

мотивацію, регулярність виконання самостійної роботи та рівень залученості здобувачів освіти до навчального процесу *(Bond M. et. al., 2024).* Водночас дидактична цінність таких платформ визначається не їхніми технологічними можливостями, а педагогічним дизайном навчальної діяльності. Практика свідчить, що найвищу ефективність демонструють цифрові ресурси, інтегровані в загальну систему навчання та спрямовані на розвиток конкретних компонентів іншомовної комунікативної компетентності. У цьому контексті інтерактивні платформи виступають не окремим засобом навчання, а складовою комплексного цифрового освітнього середовища, яке забезпечує послідовне формування мовленнєвих умінь, підтримку самостійної роботи, формувальне оцінювання та індивідуалізацію освітнього процесу *(Banihashem S. K. et. al, 2025).*

Подальший розвиток цифрових технологій зумовив активне впровадження цифрових симуляцій як одного з найбільш перспективних засобів професійно орієнтованого навчання. Цифрові симуляції моделюють реальні або наближені до реальних професійні ситуації, у яких здобувач освіти має приймати рішення, взаємодіяти з іншими учасниками, використовувати іншомовні ресурси та виконувати комунікативні завдання в умовах, максимально наближених до майбутньої професійної діяльності. На відміну від традиційних рольових ігор, цифрові симуляції забезпечують вищий рівень автентичності, інтерактивності та варіативності навчальних сценаріїв, що сприяє розвитку не лише мовних умінь, а й критичного мислення, уміння працювати з інформацією, приймати рішення та діяти в умовах професійної невизначеності.

Особливу цінність для іншомовної підготовки майбутніх офіцерів становлять симуляційні сценарії, побудовані на професійно орієнтованих комунікативних ситуаціях, які вимагають комплексного використання мовленнєвих, соціокультурних і стратегічних умінь. Саме в таких умовах іншомовна комунікативна компетентність формується не ізольовано, а в

тісному взаємозв'язку з майбутньою професійною діяльністю, що відповідає сучасному компетентнісному підходу до підготовки військових фахівців.

Важливим компонентом сучасного цифрового освітнього середовища є онлайн-комунікація, яка забезпечує принципово нові можливості для організації іншомовної взаємодії та створення автентичного мовного середовища. На відміну від традиційної аудиторної комунікації, що обмежується часовими та просторовими рамками навчального заняття, цифрові засоби комунікації дозволяють організовувати безперервну взаємодію між учасниками освітнього процесу незалежно від їхнього місцезнаходження, сприяючи розширенню комунікативного досвіду здобувачів освіти та залученню їх до реальних практик іншомовного спілкування.

Сучасні цифрові технології забезпечують реалізацію як синхронної, так і асинхронної комунікації. Синхронна взаємодія здійснюється за допомогою відеоконференцій, вебінарів, віртуальних аудиторій та інших засобів онлайн-спілкування в режимі реального часу. Асинхронна комунікація реалізується через форуми, електронну пошту, навчальні платформи, спільні цифрові проєкти та інші інструменти, що дозволяють учасникам освітнього процесу взаємодіяти незалежно від часу виконання навчальних завдань. Поєднання цих форматів створює умови для розвитку різних аспектів іншомовної комунікативної компетентності та врахування індивідуальних особливостей здобувачів освіти.

Особливого поширення в іншомовній освіті набули підходи телеколаборації (Telecollaboration), віртуального академічного обміну (Virtual exchange) та спільного міжнародного онлайн-навчання (Collaborative Online International Learning, COIL), які передбачають організацію міжкультурної взаємодії між здобувачами освіти різних країн за допомогою цифрових технологій. Дослідники відзначають, що участь у міжнародних онлайн-проєктах сприяє не лише розвитку мовленнєвих умінь, а й формуванню міжкультурної компетентності, навичок співпраці, критичного мислення та

цифрової грамотності *(O'Dowd R., 2025).* В умовах іншомовної підготовки майбутніх офіцерів такі форми взаємодії набувають особливої актуальності, оскільки дозволяють моделювати ситуації професійного міжнародного спілкування та розвивати навички комунікації в багатокультурному середовищі.

Дидактичний потенціал онлайн-комунікації полягає насамперед у створенні умов для автентичного використання іноземної мови як інструменту реальної взаємодії. На відміну від навчальних вправ, спрямованих переважно на відпрацювання окремих мовних структур, комунікативна діяльність у цифровому середовищі передбачає досягнення конкретної мети спілкування, обмін інформацією, узгодження позицій, спільне розв'язання проблем та виконання колективних завдань. Саме така діяльність найбільшою мірою відповідає сучасному комунікативному та компетентнісному підходам до навчання іноземних мов.

Крім того, цифрові засоби комунікації сприяють зниженню психологічних бар'єрів, які часто виникають під час іншомовного спілкування. Можливість попереднього опрацювання повідомлення, використання різних форматів взаємодії, поступове нарощування складності комунікативних завдань та створення комфортного освітнього середовища позитивно впливають на впевненість здобувачів освіти у власних мовленнєвих можливостях. Особливо важливим це є для розвитку продуктивних видів мовленнєвої діяльності, насамперед усного мовлення та письма, які традиційно викликають найбільші труднощі у процесі вивчення іноземної мови.

Таким чином, змішане навчання, мікронавчання, інтерактивні цифрові платформи, цифрові симуляції та онлайн-комунікація утворюють взаємопов'язану систему педагогічних технологій, яка забезпечує створення гнучкого, інтерактивного та персоналізованого освітнього середовища. Саме в межах такого середовища реалізуються дидактичні механізми розвитку іншомовної комунікативної компетентності, що охоплюють формування

рецептивних і продуктивних мовленнєвих умінь, розвиток автономності навчання та забезпечення безперервного формувального оцінювання результатів освітньої діяльності.

Системне використання цифрових технологій істотно розширює дидактичні можливості формування іншомовної комунікативної компетентності, забезпечуючи розвиток усіх видів мовленнєвої діяльності відповідно до принципів комунікативного, компетентнісного та діяльнісного підходів. На відміну від традиційних засобів навчання, цифрове освітнє середовище створює умови для інтегрованого розвитку рецептивних і продуктивних мовленнєвих умінь, забезпечуючи їх взаємозв'язок у процесі виконання реальних або наближених до реальних комунікативних завдань. Саме комплексний характер цифрового навчального середовища дає змогу організувати навчальну діяльність так, щоб окремі види мовленнєвої діяльності не формувалися ізольовано, а взаємодоповнювали один одного в єдиному процесі іншомовної підготовки *(Council of Europe Study, 2020).*

Одним із найбільш чутливих до цифрової трансформації компонентів іншомовної комунікативної компетентності є усне мовлення, розвиток якого традиційно вважався найбільш складним для організації поза аудиторним навчанням. Сучасні цифрові технології суттєво розширили можливості формування діалогічного та монологічного мовлення завдяки використанню відеоконференцій, віртуальних комунікативних просторів, цифрових симуляцій, платформ для спільної роботи та інтерактивних сервісів. Важливою перевагою цифрового середовища є створення умов для регулярної мовленнєвої практики, що не обмежується часовими рамками навчального заняття. Здобувачі освіти отримують можливість брати участь у дискусіях, виконувати рольові завдання, працювати над спільними проєктами, моделювати професійні ситуації спілкування та взаємодіяти з іншими учасниками освітнього процесу як у синхронному, так і в асинхронному форматах.

Дослідження останніх років підтверджують, що використання цифрових комунікативних технологій позитивно впливає не лише на розвиток мовленнєвої швидкості та точності висловлювання, а й на формування прагматичної компетентності, комунікативних стратегій, уміння аргументувати власну позицію та адаптувати мовлення відповідно до комунікативної ситуації *(Stickler U., 2024).* Водночас цифрове середовище створює більш психологічно комфортні умови для мовленнєвої практики, що особливо важливо для здобувачів освіти, які відчувають труднощі під час безпосереднього іншомовного спілкування.

Не менш суттєвих змін зазнала методика розвитку аудіювання. Якщо раніше основними джерелами аудіоматеріалів були навчальні записи, підготовлені спеціально для освітніх цілей, то сучасні цифрові технології забезпечують практично необмежений доступ до автентичного іншомовного контенту різних жанрів, стилів і рівнів складності. Використання подкастів, відеолекцій, інформаційних ресурсів, професійних вебінарів, навчальних платформ та мультимедійних матеріалів сприяє формуванню навичок сприйняття природного мовлення, розвитку слухової уваги, удосконаленню фонетичної компетентності та розширенню професійного словникового запасу. Водночас сучасні цифрові ресурси дозволяють адаптувати швидкість мовлення, використовувати субтитри, багаторазово відтворювати окремі фрагменти та здійснювати інтерактивний контроль розуміння того, що почуто, що забезпечує поступове ускладнення навчальних завдань відповідно до рівня підготовки здобувачів освіти *(Kukulska-Hulme A., Lee H., Norris L., 2017).*

В умовах цифрової трансформації освіти суттєво розширилися й можливості розвитку читання, яке дедалі більше пов'язується з умінням ефективно працювати з цифровими інформаційними ресурсами. Сучасний фахівець має не лише розуміти зміст іншомовного тексту, а й уміти швидко знаходити необхідну інформацію, критично оцінювати її достовірність, аналізувати різні джерела, інтегрувати отримані відомості та використовувати

їх для розв'язання професійних завдань. У зв'язку з цим цифрові технології сприяють розвитку не лише традиційних стратегій читання (ознайомлювального, переглядового, вибіркового чи детального), а й цифрової інформаційної грамотності, яка стає невід'ємною складовою іншомовної комунікативної компетентності. Використання електронних бібліотек, цифрових архівів, міжнародних інформаційних платформ та інтерактивних текстових ресурсів забезпечує постійний доступ до автентичних матеріалів, що відповідають професійним інтересам і мовному рівню здобувачів освіти.

Особливого значення цифрові технології набули у розвитку писемного мовлення, яке сьогодні розглядається не лише як засіб перевірки мовних знань, а й як інструмент професійної комунікації. Цифрове освітнє середовище забезпечує можливість систематичної практики різних видів письма, організації спільної роботи над текстами, взаємооцінювання, редагування та отримання оперативного зворотного зв'язку від викладача. Використання хмарних документів, електронних навчальних платформ, цифрових портфоліо та спеціалізованих сервісів для письма сприяє формуванню навичок академічного й професійно орієнтованого письма, розвитку мовної точності, логічності викладу та аргументації власної позиції. Крім того, цифрові технології дозволяють простежувати динаміку розвитку письмової компетентності, накопичувати результати навчальної діяльності та здійснювати їх системний аналіз, що істотно підвищує ефективність навчального процесу *(Kukulska-Hulme A., Lee H., Norris L., 2017).*

Характерною особливістю сучасної цифрової іншомовної освіти є те, що розвиток окремих видів мовленнєвої діяльності дедалі частіше відбувається в інтегрованому форматі. Наприклад, виконання проєктного завдання може передбачати пошук і критичний аналіз іншомовної інформації, прослуховування автентичних матеріалів, обговорення результатів у малих групах та підготовку письмового звіту або презентації. Така інтеграція відповідає сучасним підходам до формування іншомовної комунікативної

компетентності, оскільки відображає реальні умови професійної діяльності, у яких різні види мовленнєвої діяльності використовуються комплексно.

Водночас сучасний етап розвитку цифрової іншомовної освіти характеризується переходом від використання цифрових технологій переважно як засобів підтримки навчального процесу до їх інтеграції як активних компонентів освітнього середовища, здатних адаптувати навчальний контент, забезпечувати індивідуальний супровід здобувачів освіти та підтримувати їхню навчальну діяльність на всіх етапах формування іншомовної комунікативної компетентності. Якщо системи управління навчанням, інтерактивні платформи, цифрові симуляції та засоби онлайн-комунікації переважно забезпечують організацію освітнього процесу, то новітні цифрові технології дедалі активніше виконують функції інтелектуальної підтримки навчання, надаючи можливість оперативного аналізу навчальних досягнень, адаптації освітнього контенту, автоматизованого формувального оцінювання та персоналізованого зворотного зв'язку. У цьому контексті закономірним етапом розвитку цифрової трансформації освіти стало впровадження технологій генеративного штучного інтелекту, які суттєво розширили дидактичний потенціал цифрового освітнього середовища. На відміну від традиційних цифрових ресурсів, що функціонують переважно за наперед визначеними алгоритмами, генеративні моделі здатні створювати новий навчальний контент, моделювати різноманітні комунікативні ситуації, адаптувати навчальні матеріали до індивідуальних потреб здобувача освіти та забезпечувати персоналізований супровід навчальної діяльності. Саме ці властивості зумовлюють необхідність окремого наукового осмислення можливостей генеративного штучного інтелекту як нового етапу розвитку цифрових технологій у системі іншомовної підготовки майбутніх офіцерів.

3. Генеративний штучний інтелект як новий інструмент персоналізації іншомовної підготовки майбутніх офіцерів.

Генеративний штучний інтелект сьогодні розглядається не лише як новий цифровий інструмент, а й як одна з ключових технологій, що визначає подальший розвиток світової освіти *(UNESCO, 2018; OECD, 2023).*

Визнання потенціалу генеративного штучного інтелекту знайшло відображення у стратегічних документах провідних міжнародних організацій. У Guidance for Generative AI in Education and Research UNESCO наголошує, що генеративний ШІ має потенціал суттєво розширити доступ до освіти, підтримати персоналізоване навчання, сприяти розвитку творчого мислення та підвищити ефективність професійної діяльності викладача. Водночас організація підкреслює, що інтеграція генеративного ШІ повинна здійснюватися відповідально, із дотриманням принципів академічної доброчесності, цифрової етики, захисту персональних даних та забезпечення людського контролю над результатами роботи штучного інтелекту *(UNESCO, 2018).*

Подібної позиції дотримується й OECD, яка розглядає генеративний штучний інтелект як технологію, здатну суттєво трансформувати навчальний процес завдяки автоматизації рутинних педагогічних завдань, підтримці індивідуальних освітніх траєкторій та розвитку навичок навчання впродовж життя. При цьому наголошується, що основна цінність генеративного ШІ полягає не в заміні викладача, а в створенні нових можливостей для персоналізації навчання, підвищення якості педагогічної взаємодії та розвитку автономності здобувачів освіти *(OECD, 2023).*

У науковій літературі генеративний штучний інтелект визначають як клас моделей штучного інтелекту, здатних створювати новий контент — тексти, зображення, програмний код, аудіо- та відеоматеріали — на основі аналізу значних масивів навчальних даних *(Dwivedi Y. K. Et al., 2023; Kasneci E. Et. al., 2023).* Саме ця властивість принципово відрізняє генеративний ШІ від

попередніх цифрових технологій, які здебільшого забезпечували доступ до вже створених інформаційних ресурсів або автоматизували окремі операції. Генеративні моделі фактично виступають активними учасниками освітнього процесу, здатними підтримувати діалог, пояснювати навчальний матеріал, пропонувати альтернативні способи розв'язання навчальних завдань.

Особливої актуальності зазначені процеси набули після появи великих мовних моделей (Large Language Models, LLMs), здатних працювати з природною мовою на рівні, максимально наближеному до людської комунікації. Використовуючи глибинні нейронні мережі та алгоритми трансформерної архітектури, великі мовні моделі аналізують значні масиви текстових даних, прогнозують найбільш імовірне продовження тексту, генерують зв'язні висловлювання, здійснюють переклад, узагальнення інформації, пояснення складних понять, створення навчальних матеріалів та виконання широкого спектра мовних завдань.

На відміну від традиційних програм, які працюють за жорстко визначеними правилами або виконують обмежений набір функцій, великі мовні моделі функціонують на основі аналізу статистичних закономірностей природної мови, що дозволяє їм інтерпретувати запити користувача, підтримувати змістовний діалог, враховувати контекст спілкування та генерувати зв'язні тексти різних жанрів і рівнів складності. Саме здатність працювати з природною мовою робить великі мовні моделі принципово новим класом цифрових технологій, потенціал яких виходить далеко за межі автоматизації окремих навчальних операцій *(Bommasani R. Et. al., 2021)*.

На відміну від більшості цифрових освітніх ресурсів, які пропонують однаковий навчальний контент усім користувачам, LLM забезпечують високий рівень адаптивності. Вони можуть змінювати рівень складності навчального матеріалу, добирати приклади відповідно до попереднього досвіду здобувача освіти, пояснювати складні поняття різними способами, створювати альтернативні варіанти навчальних завдань, підтримувати тривалий навчальний

діалог та оперативно реагувати на індивідуальні запити користувача. Завдяки цьому взаємодія з великими мовними моделями набуває рис персоналізованого навчання, коли зміст і форма подання матеріалу визначаються не лише навчальною програмою, а й поточними освітніми потребами конкретного здобувача освіти.

Принциповою особливістю великих мовних моделей є також їхня універсальність. Якщо традиційні цифрові засоби навчання зазвичай виконують одну або декілька спеціалізованих функцій — тестування, демонстрацію навчального матеріалу, організацію відеоконференцій чи управління навчальним курсом, — то сучасні LLM здатні одночасно виконувати функції інформаційного консультанта, мовного партнера, редактора текстів, генератора навчального контенту, засобу формувального оцінювання та персонального цифрового наставника.

З позицій сучасної цифрової педагогіки генеративний штучний інтелект може одночасно виконувати функції інформаційного консультанта, генератора навчального контенту, засобу автоматизованого зворотного зв'язку, партнера для іншомовної комунікації та персоналізованого цифрового наставника. Така трансформація відображає перехід від використання штучного інтелекту як допоміжного інструмента до його інтеграції в педагогічний процес як активного суб'єкта навчальної взаємодії.

Практичне застосування великих мовних моделей у сучасній іншомовній освіті реалізується через низку генеративних систем, серед яких найбільшого поширення набули ChatGPT, Claude, Gemini та Microsoft Copilot. Незважаючи на спільну технологічну основу, кожна з них має власні функціональні особливості, що визначають специфіку їхнього використання в освітньому процесі. Відмінності стосуються насамперед якості ведення діалогу, роботи з великими текстами, інтеграції з цифровими сервісами, можливостей створення навчального контенту, підтримки академічного письма, мультимодальної взаємодії та персоналізації навчання. Водночас жодна з моделей не може

розглядатися як універсальний засіб розв'язання всіх педагогічних завдань, що обумовлює необхідність їх свідомого добору відповідно до конкретних дидактичних цілей.

З метою узагальнення основних характеристик сучасних генеративних моделей та визначення їхнього дидактичного потенціалу у формуванні іншомовної комунікативної компетентності здобувачів військової освіти основні можливості найбільш поширених систем подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Дидактичний потенціал сучасних мовних моделей у формуванні іншомовної комунікативної компетентності здобувачів військової освіти

Мовна модель	**Дидактичний потенціал у навчанні іноземної мови**	**Компоненти іншомовної комунікативної компетентності, що розвиваються**
ChatGPT	Генерування навчальних матеріалів, пояснення мовних явищ, створення рольових діалогів і професійно орієнтованих ситуацій, автоматизований зворотний зв'язок, персоналізація навчання	Лексична, граматична, дискурсивна, стратегічна компетентності; говоріння, письмо
Claude	Аналіз і узагальнення великих текстів, розвиток аргументованого письма, критичне осмислення інформації, робота з автентичними документами	Читання, письмо, дискурсивна та соціолінгвістична компетентності
Gemini	Інтеграція текстової, графічної, аудіо- та відеоінформації, створення мультимодальних навчальних завдань, аналіз візуального контенту	Аудіювання, говоріння, міжкультурна та соціокультурна компетентності
Microsoft Copilot	Підготовка навчальних матеріалів, спільне редагування документів, створення презентацій, підтримка проєктної діяльності, інтеграція з Microsoft 365	Академічне письмо, професійна комунікація, командна взаємодія
Perplexity AI	Пошук і критичний аналіз інформації з посиланнями на джерела, підготовка оглядів, інформаційна підтримка дослідницької діяльності	Читання, академічна грамотність, інформаційно-комунікаційна компетентність
NotebookLM	Робота з власними навчальними матеріалами, створення конспектів, тестів, узагальнень і навчальних запитань на основі завантажених документів	Автономне навчання, навчальна рефлексія, повторення матеріалу, академічне письмо

Як свідчать дані табл. 1, сучасні великі мовні моделі характеризуються різним дидактичним потенціалом, що зумовлює доцільність їх диференційованого використання відповідно до цілей іншомовної підготовки. Попри спільну здатність генерувати природномовний контент, кожна модель має функціональні особливості, які визначають її педагогічну цінність для розвитку окремих компонентів іншомовної комунікативної компетентності.

Найбільш універсальною є ChatGPT, яка забезпечує комплексну підтримку всіх видів мовленнєвої діяльності. Модель ефективно використовується для створення навчальних матеріалів, моделювання професійно орієнтованих комунікативних ситуацій, пояснення граматичних явищ, формування лексичних навичок, розвитку академічного письма та організації персоналізованої мовної практики із наданням оперативного формувального зворотного зв'язку.

Claude демонструє найвищу ефективність під час роботи з великими за обсягом автентичними текстами, що відкриває широкі можливості для розвитку навичок критичного читання, аналізу інформації, аргументованого письма та формування дискурсивної компетентності. Завдяки здатності будувати логічно структуровані пояснення ця модель є доцільною для виконання складних аналітичних і рефлексивних навчальних завдань.

Перевагою Gemini є мультимодальний характер взаємодії, який забезпечує одночасну роботу з текстовою, графічною, аудіо- та відеоінформацією. Це розширює можливості розвитку рецептивних і продуктивних видів мовленнєвої діяльності, насамперед аудіювання та говоріння, а також сприяє формуванню міжкультурної компетентності шляхом аналізу різних інформаційних джерел у єдиному навчальному середовищі. Водночас Microsoft Copilot вирізняється високим потенціалом інтеграції іншомовної підготовки з цифровими офісними середовищами. Використання цієї моделі сприяє розвитку академічного та професійного письма, навичок колективної роботи з документами, підготовки презентацій, створення звітів і

реалізації проєктної діяльності, що відповідає сучасним вимогам до професійної комунікації майбутніх офіцерів.

Окреме місце серед сучасних AI-інструментів посідають Perplexity AI та NotebookLM, які орієнтовані передусім на підтримку автономного навчання та роботи з інформацією. Якщо Perplexity AI забезпечує пошук, критичний аналіз і систематизацію відомостей із посиланнями на першоджерела, сприяючи розвитку інформаційної грамотності та навичок академічного читання, то NotebookLM дає змогу працювати з власними навчальними матеріалами, автоматично створювати конспекти, узагальнення, тестові завдання й запитання для самоконтролю. Це створює додаткові можливості для персоналізації навчання, повторення матеріалу та розвитку автономності здобувачів освіти.

Водночас результати порівняльного аналізу дають підстави стверджувати, що ефективність застосування генеративного штучного інтелекту визначається не вибором конкретної моделі, а методикою її педагогічного використання. Усі розглянуті системи можуть виступати засобами персоналізації навчання, автоматизації окремих рутинних завдань, розвитку автономності здобувачів освіти та підтримки іншомовної комунікативної практики за умови їх інтеграції в цілісну методичну систему.

Генеративний ШІ поступово трансформується з універсального цифрового інструмента у повноцінний компонент освітнього середовища, який бере участь у проєктуванні, супроводі та оцінюванні навчальної діяльності. Саме тому доцільно розглядати не лише технічні можливості окремих генеративних моделей, а й педагогічні ролі, які вони здатні виконувати в процесі іншомовної підготовки.

З позицій сучасної цифрової педагогіки генеративний штучний інтелект може одночасно виконувати функції інформаційного консультанта, генератора навчального контенту, засобу автоматизованого зворотного зв'язку партнера для іншомовної комунікації та персоналізованого цифрового наставника. Така трансформація відображає перехід від використання штучного інтелекту як

допоміжного інструмента до його інтеграції в педагогічний процес як активного суб'єкта навчальної взаємодії.

Еволюцію зазначених педагогічних ролей генеративного штучного інтелекту представлено на рис.1.

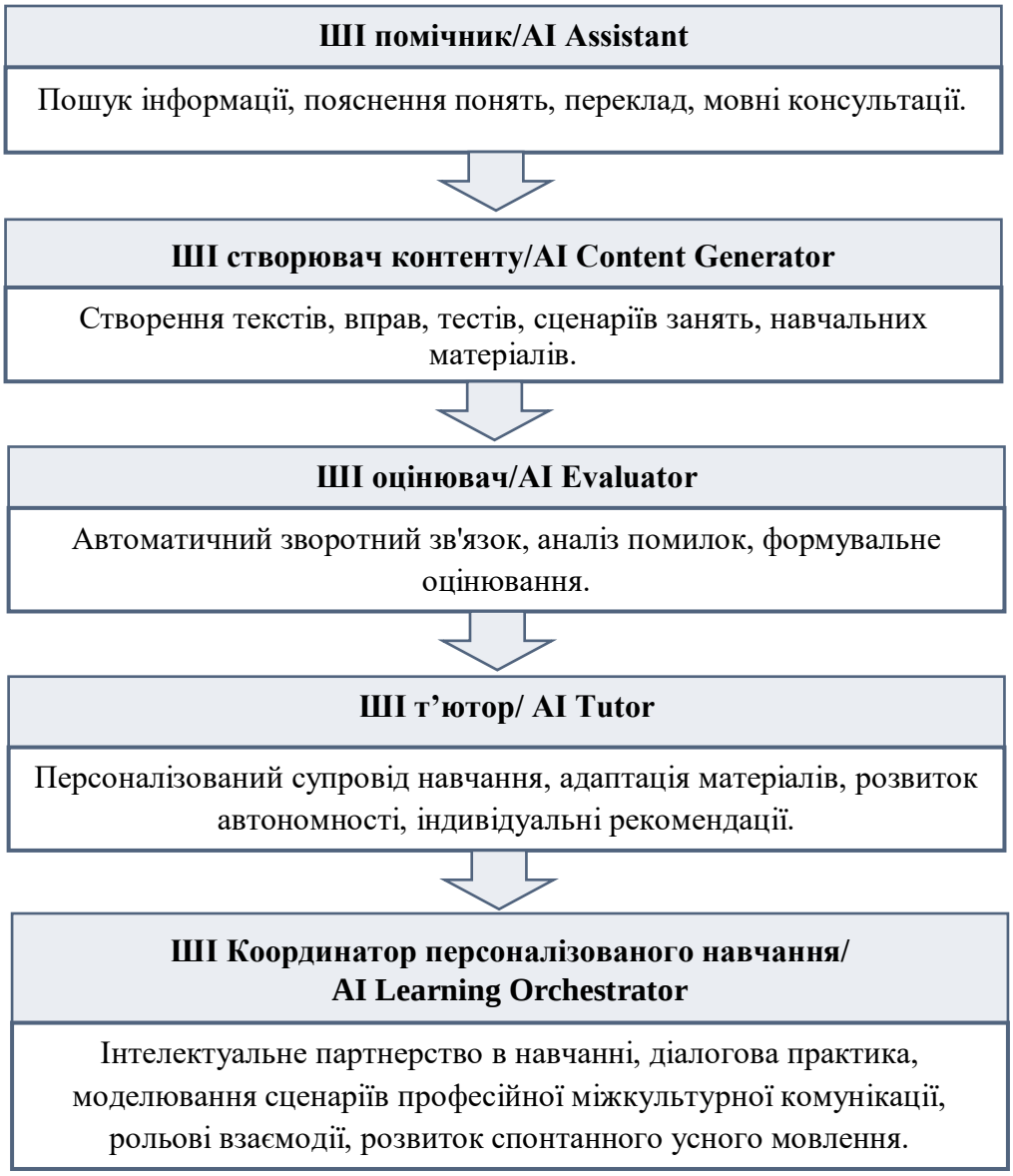

Рис. 1. Еволюція педагогічних ролей генеративного штучного інтелекту в процесі іншомовної підготовки

Джерело: авторська розробка

Незважаючи на значний дидактичний потенціал генеративного штучного інтелекту, його інтеграція в освітній процес супроводжується низкою

методичних, етичних, правових та безпекових викликів. Сучасні дослідження свідчать, що ефективність використання генеративних моделей визначається не лише їхніми функціональними можливостями, а й здатністю учасників освітнього процесу критично оцінювати результати взаємодії зі штучним інтелектом, дотримуватися принципів академічної доброчесності та забезпечувати відповідальне використання цифрових технологій.

Сучасна наукова спільнота дедалі частіше наголошує, що проблема полягає не у використанні генеративного штучного інтелекту як такого, а у способах його педагогічної інтеграції. Згідно з рекомендаціями UNESCO *(UNESCO, 2018)* застосування генеративних моделей має супроводжуватися формуванням у здобувачів освіти навичок відповідального використання ШІ, прозорого декларування його застосування, критичного аналізу отриманих результатів та усвідомлення меж відповідальності за кінцевий навчальний продукт. У зв'язку з цим змінюються і підходи до оцінювання результатів навчання: більшого значення набуває перевірка процесу виконання завдання, аргументації прийнятих рішень, рефлексії та здатності здобувача освіти пояснити власний результат.

Для іншомовної підготовки майбутніх офіцерів проблема академічної доброчесності має особливе значення, оскільки сформованість іншомовної комунікативної компетентності безпосередньо пов'язана з виконанням професійних завдань у міжнародному військовому середовищі. Використання генеративного ШІ як заміни власної мовленнєвої діяльності може призвести до формального досягнення високих результатів під час навчання без реального розвитку мовленнєвих умінь, що негативно позначається на готовності майбутніх офіцерів до професійної комунікації. Тому генеративний штучний інтелект доцільно розглядати не як засіб виконання навчальної роботи замість здобувача освіти, а як інструмент її підтримки, який сприяє розвитку мовленнєвих умінь за умови активної пізнавальної діяльності здобувачів військової освіти.

Одним із ключових викликів є забезпечення інформаційної безпеки під час використання генеративних моделей. Значна частина сучасних AI-сервісів функціонує на основі хмарних технологій, що передбачає передавання користувачем текстових, графічних або інших даних для їх подальшого опрацювання. За таких умов особливого значення набуває питання захисту персональної інформації, службових документів і конфіденційних матеріалів. Для системи військової освіти ця проблема є особливо актуальною, оскільки робота з навчальними матеріалами нерідко пов'язана з використанням професійної інформації, яка може мати обмежений доступ. З огляду на це використання генеративного штучного інтелекту потребує чіткого дотримання вимог інформаційної безпеки, регламентованого доступу до цифрових сервісів та усвідомлення користувачами потенційних ризиків передавання даних третім сторонам.

Не менш важливим аспектом є цифрова етика, що охоплює принципи відповідального, прозорого та справедливого використання генеративного штучного інтелекту в освітньому процесі. Сучасні дослідники наголошують, що взаємодія зі штучним інтелектом повинна ґрунтуватися на принципах людського контролю, недискримінації, пояснюваності алгоритмів та відповідальності за результати їх застосування *(Floridi L., Cowls J., 2019)*. У цьому контексті важливо формувати в майбутніх офіцерів не лише навички ефективного використання генеративних моделей, а й критичне ставлення до отриманої інформації, здатність оцінювати її достовірність, розуміти обмеження алгоритмів і приймати остаточні рішення на основі власного професійного судження. Таким чином, цифрова етика поступово стає невід'ємною складовою цифрової культури сучасного фахівця та однією з умов безпечної інтеграції штучного інтелекту в освітню діяльність.

Загалом, зазначені виклики не є підставою для обмеження використання генеративного штучного інтелекту в освіті, однак вони потребують переосмислення підходів до організації освітнього процесу, оновлення

нормативних документів та розвитку цифрової компетентності всіх його учасників. За таких умов ефективність використання генеративного ШІ визначатиметься не стільки технологічними можливостями самих моделей, скільки педагогічною доцільністю їх застосування, професійною підготовкою викладача та сформованістю культури відповідального використання цифрових технологій.

Перспективи розвитку генеративного штучного інтелекту в іншомовній освіті пов'язані насамперед із подальшим удосконаленням технологій персоналізації навчання, розширенням можливостей адаптивних освітніх систем та інтеграцією AI у цифрові освітні середовища. Очікується, що великі мовні моделі поступово трансформуватимуться із засобів генерації навчального контенту в інтелектуальних педагогічних агентів, здатних аналізувати індивідуальний прогрес здобувача освіти, прогнозувати можливі труднощі у навчанні, формувати персоналізовані освітні траєкторії та забезпечувати безперервний супровід процесу формування іншомовної комунікативної компетентності.

Таким чином, інтеграція цифрових технологій і генеративного штучного інтелекту відкриває перспективи подальшої модернізації іншомовної підготовки майбутніх офіцерів, однак її результативність безпосередньо залежить від науково обґрунтованого педагогічного проєктування освітнього процесу, розвитку цифрової компетентності його учасників та формування культури відповідального використання технологій штучного інтелекту.

Висновки. Цифрова трансформація освіти є одним із ключових чинників модернізації іншомовної підготовки майбутніх офіцерів. Вона зумовлює переорієнтацію освітнього процесу з традиційної моделі передачі знань на гнучке, персоналізоване та студентоцентроване навчання, у якому цифрові технології інтегруються в усі компоненти освітньої діяльності. У цих умовах цифрові компетентності викладача і здобувача освіти набувають статусу необхідної передумови ефективного формування іншомовної комунікативної

компетентності та успішної професійної діяльності в сучасному інформаційному середовищі.

Дидактичний потенціал цифрових технологій полягає у створенні адаптивного освітнього середовища, яке забезпечує інтегрований розвиток усіх видів мовленнєвої діяльності, підтримує автономне навчання, формувальне оцінювання та реалізацію індивідуальних освітніх траєкторій. Використання систем управління навчанням, мобільного та змішаного навчання, інтерактивних платформ, цифрових симуляцій і засобів онлайн-комунікації розширює можливості організації іншомовної підготовки, сприяє активізації навчально-пізнавальної діяльності здобувачів освіти та наближає процес навчання до реальних умов професійної комунікації.

Обґрунтовано, що поява генеративного штучного інтелекту стала новим етапом розвитку цифрових освітніх технологій, оскільки великі мовні моделі здатні не лише забезпечувати доступ до інформації, а й генерувати навчальний контент, адаптувати матеріали до індивідуальних потреб здобувача освіти, моделювати комунікативні ситуації, підтримувати мовленнєву практику та здійснювати автоматизований формувальний зворотний зв'язок. Це дозволяє розглядати генеративний штучний інтелект як перспективний інструмент персоналізації іншомовної підготовки, який сприяє підвищенню ефективності навчання за умови його педагогічно доцільної інтеграції. Разом із тим доведено, що використання генеративного штучного інтелекту супроводжується низкою викликів, пов'язаних із забезпеченням академічної доброчесності, достовірності згенерованої інформації, інформаційної безпеки, цифрової етики та дотриманням авторського права. Це обумовлює необхідність формування культури відповідального використання штучного інтелекту, розвитку критичного мислення, цифрової грамотності та оновлення методичних підходів до організації освітнього процесу.

Узагальнення результатів дослідження дає підстави стверджувати, що подальший розвиток іншомовної підготовки майбутніх офіцерів пов'язаний не

зі збільшенням кількості цифрових інструментів, а з їх комплексною інтеграцією в цілісну педагогічну систему. За таких умов генеративний штучний інтелект доцільно розглядати як один із компонентів сучасного цифрового освітнього середовища, що розширює можливості персоналізації навчання, підтримує професійний розвиток здобувачів освіти та сприяє підвищенню якості формування іншомовної комунікативної компетентності за умови збереження провідної ролі викладача у проєктуванні, організації та педагогічному супроводі освітнього процесу.

Генеративні моделі доцільно розглядати як інструмент інтелектуальної підтримки навчання, здатний забезпечувати персоналізацію освітньої траєкторії, автоматизований формувальний зворотний зв'язок, адаптацію навчального контенту та моделювання комунікативної взаємодії. Водночас ефективне використання таких технологій потребує дотримання принципів академічної доброчесності, цифрової етики, інформаційної безпеки та збереження провідної ролі викладача як організатора, модератора й експерта освітнього процесу.

References:

Allouche E. Digital transformation of education, systems approach and applied research. *arXiv preprint* 2024. *arXiv:2406.11861*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.11861

Al-Fraihat D., Joy M., Masa'deh R., Sinclair J. Evaluating e-learning systems success: An empirical study. *Computers in Human Behavior*. 2020. Vol. 102. P. 67–86. URL: https://surl.li/xtwaud

Banihashem S. K., Bond M., Bergdahl N., Khosravi H., Noroozi O. A systematic mapping review at the intersection of artificial intelligence and self-regulated learning. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2025. Vol. 22, No. 1. Art. 50. DOI:10.13140/RG.2.2.13057.47207

Bommasani R., Hudson D. A., Adeli E., Altman R., Arora S., von Arx S. та ін. *On the Opportunities and Risks of Foundation Models*. Stanford : Center for Research on Foundation Models, 2021. arXiv:2108.07258. URL: https://arxiv.org/abs/2108.07258 (дата звернення: 22.07.2026).

Bond M., Khosravi H., De Laat M., Bergdahl N., Bedenlier S., Zawacki-Richter O., Siemens G. A meta systematic review of artificial intelligence in higher education: A call for increased ethics, collaboration and rigour. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2024. Vol. 21. Art. 4. https://doi.org/10.1186/s41239-023-00436-z

Council of Europe Study DGI. Towards Regulation of AI Systems: Global Perspectives on the Development of a Legal Framework on Artificial Intelligence Systems Based on the Council of

Europe's Standards on Human Rights, Democracy and the Rule of Law. Strasbourg, 2020. URL: https://surl.li/useomg

Cukurova M. A Conceptual Framework for Teacher Agency in STEM Education in the AI Era. *STEM Education: Shaping Future Learning Practices in the Age of AI*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2026. P. 31–57. DOI:10.1007/978-981-95-9023-0_2

Cukurova M., Kralj L., Hertz B., Saltidou E. *Professional Development for Teachers in the Age of AI*. Brussels : European Schoolnet, 2024. URL: https://surl.li/rlkfxj

Dwivedi Y. K., Kshetri N., Hughes L., Slade E. L., Jeyaraj A., Kar A. K., Baabdullah A. M., Koohang A., Raghavan V., Ahuja M., Albanna H., Albashrawi M., Al-Busaidi A. S. та ін. So what if ChatGPT wrote it? Multidisciplinary perspectives on opportunities, challenges and implications of generative conversational AI for research, practice and policy. *International Journal of Information Management*. 2023. Vol. 71. Art. 102642. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102642

European Commission. *Digital learning and ICT in education.* URL: https://surl.li/rduvcf (дата звернення: 22.07.2026).

European Commission. DigComp 2.2: The Digital Competence Framework for Citizens - With new examples of knowledge, skills and attitudes. 2022. URL: https://surl.li/qthlqu (дата звернення: 22.07.2026).

Floridi L., Cowls J. A Unified Framework of Five Principles for AI in Society. *Harvard Data Science Review*. 2019. Vol. 1, No. 1. https://doi.org/10.1162/99608f92.8cd550d1

Graham C. R., Borup J., Pulham E., Larsen R. K–12 blended teaching readiness: Model and instrument development. *Journal of Research on Technology in Education*. 2019. Vol. 51, No. 3. P. 239–258. DOI:10.1080/15391523.2019.1586601

Graham C. R., Halverson L. R. Blended Learning Research and Practice. *Handbook of Open, Distance and Digital Education* / eds. O. Zawacki-Richter, I. Jung. Singapore : Springer, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2080-6_68

Holmes W., Bialik M., Fadel Ch. *Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning*. Boston : Center for Curriculum Redesign, 2019. URL: https://surl.li/ngthec

Hug T. Microlearning Formats in Crisis? Theses in the Field of Tension Between Corona-Induced Short-Term Solutions, Apodictic Rhetoric's of No Alternatives and Perspectives Open to the Future. *Microlearning: New Approaches to a More Effective Higher Education*. Cham : Springer, 2022. P. 125–139. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-13359-6_8

Kasneci E., Sessler K., Küchemann S., Bannert M., Dementieva D., Fischer F., Gasser U., Groh G., Günnemann S., Hüllermeier E., Krusche S., Kutyniok G., Michaeli T., Nerdel C., Pfeffer J., Poquet O., Sailer M., Schmidt A., Seidel T., Stadler M., Weller J., Kuhn J., Kasneci G. ChatGPT for Good? On Opportunities and Challenges of Large Language Models for Education. *Learning and Individual Differences*. 2023. Vol. 103. Art. 102274. https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274

O'Dowd R. Issues of Equity and Inclusion in Virtual Exchange. *Language Teaching*. 2025. Vol. 58, No. 1. P. 44–56. DOI:10.1017/S026144482300040X

OECD. *Generative AI in the Classroom: From Hype to Reality?* Paris : OECD Publishing, 2023. URL: https://surl.li/vnjpbp (дата звернення: 22.07.2026).

O'Neill G., McMahon T. Student-Centred Learning: What Does It Mean for Students and Lecturers? *Emerging Issues in the Practice of University Learning and Teaching*. Dublin : AISHE, 2005. URL: https://surl.li/gwmtrn (дата звернення: 22.07.2026).

Kukulska-Hulme A., Lee H., Norris L. Mobile Learning Revolution. *The Handbook of Technology and Second Language Teaching and Learning* / eds. C. A. Chapelle, S. Sauro. Hoboken : Wiley-Blackwell, 2017. https://doi.org/10.1002/9781118914069.ch15

Redecker C. *European Framework for the Digital Competence of Educators: DigCompEdu* / ed. Y. Punie. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2017. DOI:10.2760/159770

Rubio-Gragera M., Cabero-Almenara J., Palacios-Rodríguez A. Digital Innovation in Language Teaching: Analysis of the Digital Competence of Teachers According to the DigCompEdu Framework. *Education Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 4. Art. 336. https://doi.org/10.3390/educsci13040336

Stickler U. *Technology and Language Teaching*. Cambridge : Cambridge University Press, 2022. 88 p. https://doi.org/10.1017/9781108874403

Thillainadesan J., Le Couteur D. G., Haq I., Wilkinson T. J. When I Say… Microlearning. *Medical Education*. 2022. Vol. 56, No. 8. P. 791–792. https://doi.org/10.1111/medu.14848

UNESCO. UNESCO ICT Competency Framework for Teachers. Version 3. 2018. URL: https://surl.li/igfqsj (дата звернення: 22.07.2026).

Zawacki-Richter O., Bai J. Y., Lee K., Slagter van Tryon P. J., Prinsloo P. New Advances in Artificial Intelligence Applications in Higher Education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2024. Vol. 21, No. 1. Art. 32. https://doi.org/10.1186/s41239-024-00464-3

Zawacki-Richter O., Marín V. I., Bond M., Gouverneur F. Systematic Review of Research on Artificial Intelligence Applications in Higher Education – Where Are the Educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2019. Vol. 16. Art. 39. DOI:10.1186/s41239-019-0171-0

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-259
UDC 378.147.091.31:519.1

CHAPTER 8.
DIDACTIC FOUNDATIONS OF DIGITALIZING DISCRETE MATHEMATICS TEACHING: VISUALIZATION, PERSONALIZATION, AND ADAPTIVE MONITORING

Viktoriia KRAVCHENKO
Sineor lecturer of the Department of Fundamental Disciplines Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology
(45/1, Kniaziv Ostrozkykh., Kyiv, 01011, Ukraine)
viktoriia.kravchenko@viti.edu.ua
https://orcid.org/0000-0003-0399-7013

Abstract. The monograph chapter reveals the didactic foundations of digitalizing discrete mathematics instruction based on the use of free interactive digital tools for higher education students majoring in IT and cybersecurity. The conceptual foundation of the methodology relies on a multi-level synthesis of cognitive and pedagogical theories, including Dual Coding Theory (A. Paivio), Cognitive Theory of Multimedia Learning (R. Mayer), Concept Image Theory (S. Vinner & D. Tall), APOS Model (E. Dubinsky), Van Hiele levels, TPACK, and Cognitive Apprenticeship. The developed approach is structured across three content modules: set theory, relations, and combinatorics (utilizing GeoGebra, Penrose, RelCalculator, Google Sheets); Boolean algebra and logic (incorporating Tinkercad Circuits, Wokwi, LogicLearner, Master of Logic); graph theory, trees, and automata (based on GraphVisual, finsm.io, GeoGebra). Mechanisms for designing individualized learning trajectories and implementing adaptive formative and summative knowledge monitoring using Numbas, PrairieLearn, LMS Moodle, and gamified platforms are outlined. The didactic effectiveness of systematically implementing interdisciplinary links with cybersecurity disciplines is substantiated.

Keywords: graph theory, Boolean algebra, cognitive load, cybersecurity, computer modeling, formative assessment.

ДИДАКТИЧНІ ЗАСАДИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ НАВЧАННЯ ДИСКРЕТНОЇ МАТЕМАТИКИ: ВІЗУАЛІЗАЦІЯ, ПЕРСОНАЛІЗАЦІЯ ТА АДАПТИВНИЙ МОНІТОРИНГ

Анотація. У розділі монографії розкрито дидактичні засади цифровізації навчання дискретної математики на основі використання безкоштовних інтерактивних цифрових інструментів для здобувачів вищої освіти ІТ-спеціальностей та галузі кібербезпеки. Концептуальну основу методики становить багаторівневий синтез когнітивних і методичних теорій, зокрема теорії подвійного кодування А. Пайвіо, когнітивної теорії мультимедійного

навчання Р. Майєра, теорії концептуального образу Ш. Віннера та Д. Талла, моделей APOS Е. Дубінського, рівнів Ван Хіле, TPACK та когнітивного наставництва. Розроблений підхід структуровано за трьома змістовими модулями: теорія множин, відношень і комбінаторика (із застосуванням GeoGebra, Penrose, RelCalculator, Google Sheets); алгебра логіки та булева алгебра (із залученням Tinkercad Circuits, Wokwi, LogicLearner, Master of Logic); теорія графів, дерев і автоматів (на основі GraphVisual, finsm.io, GeoGebra). Окреслено механізми побудови індивідуальної освітньої траєкторії та адаптивного формувального й підсумкового моніторингу знань на базі платформ Numbas, PrairieLearn, Moodle LMS та гейміфікованих сервісів. Обгрунтовано дидактичну ефективність системної реалізації міжпредметних зв'язків із фаховими дисциплінами кібербезпеки.

Ключові слова: теорія графів, булева алгебра, когнітивне навантаження, кібербезпека, комп'ютерне моделювання, формувальне оцінювання**.**

Вступ. Сучасний етап розвитку вищої технічної освіти характеризується глибокою фундаменталізацією змісту природничо-наукової підготовки в умовах стрімкої цифрової трансформації освітнього середовища. Серед дисциплін математичного циклу дискретна математика посідає фундаментальне місце, виступаючи теоретичним та методологічним підґрунтям для системного аналізу, алгоритмізації, програмної інженерії, штучного інтелекту та кібербезпеки.

Водночас дидактична практика у закладах вищої освіти свідчить про наявність глибоких когнітивних труднощів у здобувачів вищої освіти під час засвоєння фундаментальних понятійних конструкцій дискретної математики (множини, бінарні відношення, булеві функції, графи, деревні структури, скінченні автомати). Високий рівень абстракції, дискретна природа об'єктів та відсутність безпосередніх фізичних аналогів у навколишньому світі нерідко призводять до формалізму у знаннях та відсутності стійких ментальних моделей *(Clark, Paivio, 1991).*

Традиційні методи викладання дискретної математики, орієнтовані переважно на статичний аналіз або репродуктивне розв'язування стандартних задач, виявляють обмежену ефективність у формуванні фахових компетентностей майбутніх фахівців з інформаційних технологій. Формалізм

знань виявляється у спроможності студентів відтворити абстрактні формули чи алгоритми без розуміння їхньої внутрішньої логіки, геометричної чи обчислювальної інтерпретації та без уміння застосовувати їх у реальних інженерних сценаріях *(Tall, Vinner, 1981; Mayer, 2005).*

Цифрова трансформація освіти вимагає якісного перегляду педагогічних технологій шляхом упровадження безкоштовних інтерактивних цифрових інструментів, які дозволяють трансформувати пасивне сприйняття абстрактної теорії у дослідницький, діяльнісний процес комп'ютерного моделювання, обчислювального експерименту та апаратного симулювання *(Mishra, Koehler, 2006).*

Актуальність дослідження посилюється необхідністю подолання суттєвих суперечностей між зростаючими вимогами високотехнологічних галузей до рівня сформованості алгоритмічного, системного та критичного мислення IT-фахівців і традиційними репродуктивними методиками навчання; потужним дидактичним потенціалом безкоштовного хмарного та відкритого програмного забезпечення і відсутністю цілісної, науково обґрунтованої методичної системи його системного застосування у курсі дискретної математики та потребою у забезпеченні персоналізованої навчальної траєкторії здобувачів та високою часовою затратністю традиційного ручного контролю й діагностики знань *(Clow, 2013; Ronanki, 2024).*

Метою даного розділу монографії є теоретичне обґрунтування, розробка та методичне проектування педагогічної системи використання безкоштовних інтерактивних цифрових інструментів у навчанні дискретної математики, спрямованої на забезпечення глибокої когнітивної візуалізації, персоналізації освітнього процесу та автоматизації контролю знань здобувачів вищої освіти.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні науково-методичні завдання:

1) розкрити теоретико-когнітивні засади застосування цифрових засобів у навчанні дискретних структур на основі синтезу відомих моделей;

2) розробити методику інтерактивної візуалізації, комп'ютерного моделювання та апаратного симулювання дискретних об'єктів у деяких інтерактивних середовищах;

3) обґрунтувати методичні засади побудови системи автоматизованого оцінювання, персоналізації та адаптивного контролю на базі певних платформ; 4) показово розкрити наскрізні міжпредметні зв'язки дискретної математики з професійно-орієнтованими дисциплінами галузі кібербезпеки та інформаційних технологій.

1. Методика інтерактивної візуалізації, динамічного моделювання математичних об'єктів.

Формування математичної компетентності майбутніх фахівців з інформаційних технологій під час вивчення дискретної математики у закладах вищої освіти супроводжується подоланням високого бар’єра абстракції. На відміну від класичного математичного аналізу, де значна частина об’єктів має неперервний геометричний аналог, дискретна математика оперує суто дискретними, комбінаторними та формально-логічними конструкціями, зокрема множинами, бінарними відношеннями, булевими функціями, графовими топологіями та скінченними автоматами.

Побудова ефективної методичної системи викладання цих структур вимагає застосування теоретично обґрунтованого цифрового інструментарію візуалізації, що спирається на ключові концепції сучасної когнітивної психології та дидактики вищої школи. Теоретичним фундаментом розроблюваної методики виступає низка взаємопов'язаних теорій, які пояснюють різні аспекти навчального процесу: від когнітивних механізмів засвоєння інформації до організаційних форм взаємодії.

Фундаментальною основою розробленої методики є теорія подвійного кодування Аллена Пайвіо *(Paivio, 1991).*

Згідно з цією концепцією, людська когнітивна система опрацьовує інформацію двома незалежними, але взаємопов’язаними підсистемами:

вербально-символьною, яка відповідає за текст, математичну символіку й формальні вирази, та невербально-візуальною, що обробляє зображення, графіки, просторові структури й інтерактивні схеми.

При традиційному викладанні дискретної математики спостерігається суттєвий ухил у вербально-символьний канал, що спричиняє швидке перевантаження оперативної пам'яті здобувачів. Інтеграція інтерактивних цифрових засобів візуалізації дозволяє рівноправно залучити невербально-візуальний канал, формуючи подвійні когнітивні репрезентації об'єктів. Одночасна трансляція символьного запису у візуальний аналог суттєво знижує когнітивне навантаження та забезпечує глибше засвоєння навчального матеріалу.

У межах запропонованої методики теорія подвійного кодування обґрунтовує необхідність постійного супроводу символьних виразів візуальними репрезентаціями. Наприклад, булевий вираз (символьний канал) стає зрозумілішим, коли супроводжується логічною схемою (образний канал), а матриця суміжності графа — коли її візуалізують у вигляді орієнтованого графа.

Когнітивна теорія мультимедійного навчання (CTML) Р. Майєра *(Mayer, 2005)* розвиває ідеї подвійного кодування та базується на трьох ключових принципах:

1. Обробка інформації відбувається через два окремі канали — вербальний та візуально-образний.

2. Кожен канал має обмежену пропускну здатність — це вимагає ретельного дозування навчального матеріалу та уникнення когнітивного перевантаження.

3. Навчання є активним процесом, що включає відбір, організацію та інтеграцію інформації з наявними знаннями.

Принцип обмеженої пропускної здатності каналів вимагає, щоб візуалізація була цілеспрямованою та не перевантажувала робочу пам'ять

студента надлишковими деталями. Наприклад, при демонстрації алгоритму обходу графа важливо виділяти лише поточний крок, а не показувати одночасно всі етапи. Принцип активного навчання вказує на необхідність залучення студентів до активної пізнавальної діяльності під час роботи з мультимедійними матеріалами. Це означає, що інтерактивні інструменти повинні не просто демонструвати готові рішення, а спонукати студента до самостійних маніпуляцій з об'єктами вивчення.

Розуміння специфіки засвоєння математичних понять поглиблюється через концепцію Д.Талла та Ш. Віннера *(Tall, Vinner, 1981)*щодо розмежування концептуального визначення (Concept Definition) та концептуального образу (Concept Image). Перше являє собою суворе формальне формулювання поняття, зафіксоване у підручниках чи аксіомах, тоді як друге відображає цілісну сукупність ментальних картин, візуальних уявлень та асоційованих властивостей, що сформувалися у свідомості студента. Головна дидактична проблема полягає в тому, що під час розв'язання практичних задач здобувачі вищої освіти спираються не на формальне визначення, а на наявний концептуальний образ. Якщо цей образ є фрагментарним або викривленим, виникає ефект формалізму знань, коли студент здатний відтворити визначення на пам'ять, але неспроможний застосувати його на практиці.

Ідеальне засвоєння вимагає двосторонньої взаємодії між обома компонентами математичного знання. Якщо студент знає означення булевої алгебри, але не має концептуального образу (наприклад, не уявляє логічного вентиля), він не зможе застосувати знання. Саме візуалізація в дискретній математиці покликана наповнити «клітинку» концептуального образу. Наприклад, студент, який бачить логічну схему в Tinkercad (*Tran, 2026*), формує концептуальний образ булевої функції, який потім взаємодіє з формальним означенням. Застосування динамічних цифрових середовищ спрямоване на цілеспрямоване розширення та збагачення концептуального

образу через наочну демонстрацію крайніх випадків, інваріантів та динамічних трансформацій математичних сутностей.

Процес засвоєння дискретних структур також підпорядковується закономірностям етапного розвитку математичного мислення, які описуються в адаптованій моделі рівнів Ван Хіле.*(Van Hiele, 1986)* На початковому наочному рівні здобувач сприймає математичний об'єкт як цілісний зоровий образ, після чого на аналітичному рівні починає виділяти його окремі властивості та елементи. Наступний рівень неформальної дедукції передбачає усвідомлення логічних зв'язків між властивостями об'єктів, що готує підґрунтя для переходу до рівнів строгої дедукції та логічної строгості, де здійснюється побудова формальних математичних доведень у символьному вигляді й порівняльний аналіз аксіоматичних систем. У цьому контексті цифрові засоби візуалізації виступають у ролі дидактичного містку, який забезпечує плавний і обґрунтований перехід здобувачів від наочно-образного сприйняття до абстрактно-дедуктивного мислення. Хоча модель Ван Хіле була розроблена для геометрії, її принципи застосовні до дискретної математики: студенти проходять послідовні рівні розуміння — від візуального розпізнавання через аналіз і неформальне дедуктивне мислення до формальної дедукції. Візуалізація особливо важлива на початкових рівнях: перш ніж студент зрозуміє формальне означення дерева чи автомата, він має «побачити» їх як цілісні структури. Дослідження показують, що технологічно підсилене навчання за фазами Ван Хіле *(Van Hiele, 1986)* сприяє швидшому просуванню студентів між рівнями порівняно з традиційним навчанням.

Водночас візуалізація не є універсальним засобом і має чіткі когнітивні та гносеологічні обмеження, ігнорування яких призводить до зниження якості математичної підготовки. Надмірна графічна динаміка або занадто складний інтерфейс інструменту викликають когнітивне перевантаження, відволікаючи увагу студента від математичного змісту. Пасивне спостереження за естетично привабливою анімацією алгоритмів формує ілюзію розуміння, коли у студента

виникає помилкове відчуття опанування матеріалу, яке руйнується при спробі самостійно розв'язати задачу або написати програмний код. Крім того, існує небезпека заміщення математичної строгості частковим візуальним інваріантом, коли студент фіксує свідомість на окремому рисунку замість загального доведення, а також загроза формування ефекту візуального якоря, тобто психологічної залежності від графічного інтерфейсу, що блокує перехід до суто абстрактного мислення.

Модель APOS, запропонована Е. Дубінським *(Cottrill, Dubinsky,1996)* описує етапи формування математичного поняття: Action (дія) — виконання операції за зовнішньою інструкцією; Process (процес) — усвідомлення послідовності дій, здатність їх уявити без виконання; Object (об'єкт) — сприйняття поняття як цілісної структури, якою можна оперувати; Schema (схема) — інтеграція поняття з іншими поняттями в цілісну систему. Візуалізація найбільш ефективна на етапі реіфікації (objectification), коли студент починає бачити в послідовності кроків цілісний об'єкт. Наприклад, покрокова візуалізація алгоритму Дейкстри з колірним маркуванням вершин дає змогу студентові побачити логіку обходу графа як єдиний процес, а не як механічну послідовність дій. Модель APOS також обґрунтовує послідовність використання інструментів: спочатку студент виконує дії з готовими аплетами (Action), потім усвідомлює алгоритм (Process), далі будує власні моделі (Object) і, нарешті, інтегрує їх у систему знань про графи (Schema).

Модель когнітивного наставництва (Cognitive Apprenticeship) (Collins , Brown, 1991) описує навчання через занурення в автентичну практику під керівництвом експерта. Ключові методи: Моделювання — викладач демонструє міркування вголос; Коучинг — викладач спостерігає та коригує; Скаффолдинг — поступове зняття підтримки; Артикуляція — студент проговорює свої кроки; Рефлексія — порівняння власних дій із діями експерта. Дослідження — самостійне розв'язування задач. Для візуалізації це означає, що інтерактивна демонстрація алгоритму на графі — це не просто «картинка», а модель

мисленнєвого процесу, який студент потім відтворює самостійно. У методиці це реалізується через послідовність: демонстрація викладачем → спільне виконання → самостійна робота студента.

Модель TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge) описує взаємозв'язок трьох знань: технологічного (знання інструментів), педагогічного (знання методів навчання) та змістового (знання предмета) *(Mishra P., Koehler M. J., 2006; Nguyen, 2025; Deb, Sofal, 2026).* Ефективна візуалізація в дискретній математиці виникає не просто від використання GeoGebra *(Hohenwarter, 2007)* чи Tinkercad , а від того, що викладач розуміє, який саме інструмент і який тип візуалізації найкраще розкриває конкретне поняття. У межах методики це означає, що вибір інструменту має бути підпорядкований дидактичній меті, а не навпаки. Наприклад, для теорії множин доцільно використовувати GeoGebra (динамічні діаграми Венна), а для скінченних автоматів — finsm.io (побудова та симуляція DFA) *(Dutton, 2024).*

Розглянуті теорії не суперечать одна одній, а утворюють багаторівневу систему обґрунтування.

Таблиця 1.

Багаторівнева система теоретичного обґрунтування методики

Рівень	**Теорія**	**Що обгрунтовує**
Когнітивний	Подвійне кодування (Paivio)	Чому поєднання формули та графа працює
Когнітивний	CTML (Mayer)	Як дозувати мультимедійний матеріал
Когнітивний	Концептуальний образ (Vinner)	Як наповнити означення образним змістом
Методичний	Van Hiele	Як вибудувати послідовність рівнів
Когнітивний	APOS (Dubinsky)	На якому етапі візуалізація найпотрібніша
Методичний	Cognitive Apprenticeship (Collins , Brown)	Як організувати перехід від демонстрації до самостійності
Методичний	TPACK (Mishra, Koehler)	Як відбирати інструменти

Відбір інструментів візуалізації здійснювався за трьома критеріями: безкоштовність для закладів вищої освіти, можливість роботи безпосередньо в браузері без встановлення, відповідність змістовим модулям курсу.

Для подолання когнітивних обмежень та реалізації потенціалу цифрових засобів розроблено систему практичних методичних прийомів, які інтегровано в усі три змістові модулі навчальної дисципліни *(Mushak, 2026).*

У межах першого модуля, присвяченого теорії множин, відношень та комбінаториці, методичні прийоми орієнтовані на формування первинних візуально-матричних моделей. Центральним об'єктом візуалізації виступає відношення, яке може бути представлене в чотирьох взаємопов'язаних формах: як множина впорядкованих пар, таблиця, орієнтований граф та матриця суміжності. Методична цінність одночасного подання всіх чотирьох репрезентацій полягає в тому, що студент усвідомлює їхню еквівалентність та вчиться перекодовувати інформацію з однієї форми в іншу.

Застосування сервісу Penrose *(Kerins, 2017)* дозволяє реалізувати текстово-графічну візуалізацію, коли студент вводить формальний математичний опис операцій над множинами або відношеннями спеціальною мовою описів, а інструмент автоматично генерує векторну діаграму Ейлера-Венна чи граф відношення. Це забезпечує миттєвий зворотний зв'язок та інтегрує вербальний і візуальний канали сприйняття.

Комп'ютерний аналіз бінарних відношень поглиблюється через інструмент RelCalculator *(Alvarado-Zamora, 2017),* за допомогою якого студенти здійснюють автоматичну побудову матриць відношень, розраховують їх замикання та здійснюють поелементну перевірку властивостей рефлексивності, симетричності й транзитивності.

Для побудови графічних інтерпретацій відношень на числових множинах залучається динамічне середовище GeoGebra *(Чемерис, 2024; Чемерис, Мельник, 2026; Бойко,2025),* де досліджуються геометричні області на декартовій площині. GeoGebra дозволяє будувати динамічні моделі, де зміна

пар елементів миттєво оновлює граф і матрицю. Google Sheets надає вбудовані функції для комбінаторних обчислень та можливість рекурсивного моделювання (трикутник Паскаля).

Приклад. (Побудова динамічних діаграм Ейлера-Венна для теореми про розмірності множин). Для трьох множин A, B, C у GeoGebra будуються три кола із центрами в динамічних точках O_1, O_2, O_3 та змінними радіусами r_1, r_2, r_3. Використовуючи команду умовного виділення об'єктів та логічні оператори GeoGebra (&&, ||, !), створюються зафарбовані динамічні області: перетин обєдніння та доповнення.

При переміщенні центрів кіл O_1, O_2, O_3 площа відповідних перетинів та об'єднань динамічно перераховується. Використовуючи вбудовану команду Area(), GeoGebra обчислює площі графічних фігур, що ілюструє формулу включень-виключень (принцип включення-виключення):

$$|A \cup B \cup C| = |A| + |B| + |C| - |A \cap B| - |A \cap C| - |B \cap C| + |A \cap B \cap C|.$$

Приклад. (Динамічне графічне моделювання бінарних відношень на числових множинах)

У GeoGebra бінарне відношення R між числовими множинами A та B розглядається як підмножина декартового добутку $R \subseteq A \times B$, що зображується у вигляді області чи геометричного місця точок на декартовій площині.

Для вивчення властивостей відношень (рефлексивність, симетричність, антисиметричність, транзитивність) у GeoGebra створюється інтерактивний модельний аплет зі змінними параметрами:

Крок 1. Налаштування параметрів: 1. Створюються параметричні повзунки $a, b, c \in [-5; 5]$ із кроком 0.1.

Крок 2. Формування умов відношення: 2. Задається відношення R у вигляді умовної області, наприклад, $R: x^2 + ay \leq bx + c$ або $R: |x - y| \leq a$.

Крок 3. Перевірка симетричності: 3. Для демонстрації симетричності відношення будується симетричне відношення R^{-1}, яке отримується

дзеркальним відображенням області відносно прямої $y = x$ (команда Reflect(R, Line((0,0), (1,1)))

Здобувачі наочно спостерігають: відношення є симетричним тоді й лише тоді, коли графічна область R повністю збігається зі своїм відображенням R^{-1}.

Крок 4. Перевірка рефлексивності: 4. Для перевірки рефлексивності на множині A на площину виноситься бісектриса першого й третього координатних чвертей (пряма $y = x$). Відношення є рефлексивним, якщо ця пряма повністю належить графічній області R.

Дидактичний ефект полягаю в тому, що студент змінює значення a, b, c і бачить, як фізично трансформується область відношення та в який момент руйнується чи виникає властивість транзитивності чи симетричності.

Методика проведення заняття передбачає таку послідовність: спочатку викладач демонструє статичний приклад відношення в усіх чотирьох формах; далі студенти отримують завдання самостійно змінити одну з форм і передбачити, як зміняться інші; після цього проводиться перевірка передбачень через інтерактивну маніпуляцію.

Таблиця 2.

Додаткові засоби візуалізації для модуля 1

Інструмент	**Застосування**
Google Sheets	Комбінаторика, трикутник Паскаля
Maxima	Відношення між множинами, комбінаторика
SageMath	Комбінаторика

Другий модуль, що охоплює алгебру логіки та булеву алгебру, спирається на методичні прийоми автоматизованого аналізу та побудови таблиць істинності. Основним засобом візуалізації виступають логічні схеми. Tinkercad Circuits та Wokwi *(Кучерук, 2023; Гайдусь, 2024)* дозволяють студентам будувати схеми з перемикачами AND, OR, NOT, XOR та одразу спостерігати результат при різних вхідних сигналах. LogicLearner *(Inamdar, 2025)* забезпечує

покрокове практикування доведень у пропозиційній логіці з автоматичними підказками.

Методика включає три етапи. На першому етапі студенти аналізують готову схему та відновлюють відповідний булевий вираз. На другому — отримують вираз і самостійно будують схему. На третьому етапі проводиться порівняння різних схем, що реалізують одну функцію, з метою виявлення найбільш економної.

З позицій теорії концептуального образу *(Tall, Vinner, 1981),* побудова логічної схеми в Tinkercad дозволяє студентові сформувати концептуальний образ булевої функції, який потім взаємодіє з формальним означенням. З позицій когнітивного наставництва, послідовність «демонстрація → спільне виконання → самостійна робота» реалізує методи моделювання, коучингу та скаффолдингу.

Спеціалізований прикладний математичний пакет Master of Logic, розроблений науковцями Черкаського державного технологічного університету *(Любченко, Триус, 2004; Lyubchenko, 2013*) є вітчизняним спеціалізованим середовищем, повністю адаптованим під дидактичні потреби викладання алгебри висловлювань та теорії булевих функцій. У структурі навчальної дисципліни «Дискретна математика» програмний пакет Master of Logic виступає інструментальним засобом комп'ютерно-орієнтованої підтримки змістового модуля 2 . Програма орієнтована на комплексне розв'язання базових та ускладнених задач математичної логіки, забезпечуючи автоматизоване побудування таблиць істинності, зведення функцій до досконалих та мінімальних нормальних форм (ДДНФ та ДКНФ), покрокову перевірку рівносильності формул, дослідження логічного слідування та комп'ютерний аналіз функціональної повноти систем булевих функцій за критерієм Поста.

На комп'ютерно-орієнтованих практичних заняттях викладач реалізує комбіновану методику, яка поєднує попередній «ручний» розрахунок із

подальшою візуально-комп'ютерною верифікацією та формувальним самоконтролем:

1. Етап ручного розрахунку та комп'ютерної верифікації: студент отримує завдання побудувати таблицю істинності для функції від 3–4 змінних вручну у робочому зошиті, вказуючи порядок виконання операцій та виписуючи вектор значень. Після цього завдання вводиться в програму Master of Logic, де відбувається порівняння результатів. У разі виявлення розбіжностей програма дозволяє миттєво локалізувати операцію, на якій припущено помилку.

2. Етап аналізу еквівалентності та пошуку контрприкладів: здобувачам пропонується перевірити рівносильність складних логічних виразів (наприклад, Законів де Моргана або правил поглинання/склеювання). У вікні «Рівносильність» викладач спонукає студентів натиснути кнопку «Додатково», яка виводить на екран конкретні набори істинності змінних, на яких формули приймають різні значення. Це створює наочний протиприклад, що має високу дидактичну цінність.

3. Етап дослідження функціональної повноти за Критерієм Поста: студенти вводять систему булевих функцій, задану матрицею або векторами значень, і за допомогою пункту «Система» отримують автоматично сформовану таблицю приналежності до п'яти класів Поста (T_0, T_1, S, M, L). Якщо система не є функціонально повною, програма вказує, який саме клас заблоковано, що спонукає студента самостійно підібрати додаткову функцію для забезпечення повноти.

Використання спеціалізованого середовища Master of Logic дозволяє здобувачам здійснювати автоматизоване побудування таблиць істинності для складних булевих виразів, виконувати їх автоматичне зведення до досконалих диз'юнктивних та кон'юнктивних нормальних форм, аналізувати логічне слідування та досліджувати повноту систем булевих функцій за Критерієм Поста через наочну графічну інтерпретацію замкнених класів.

Функціонал GeoGebra (Siregar,2025; Yilmaz, 2026) 3D дозволяє геометрично інтерпретувати булевий гіперкуб та склеювання імплікант. Це досягається побудовою восьми вершин куба у 3D-просторі, що відповідають наборам (інтерпретаціям) змінних, кольоровим підсвічуванням лише тих вершин, на яких булева функція дорівнює одиниці та обєднанням сусідніх вершин ребром (імпліканта), або чотирьох гранню.

Таблиця 3.

Додаткові засоби візуалізації для модуля 2

Інструмент	**Застосування**
Google Sheets/ Microsoft Excel	Таблиці істинності, ДДНФ та ДКНФ
Maxima	Булева логіка
SageMath	Алгебра логіки
Wokwi	Симулятор Arduino: логіка, логічний аналізатор

У третьому модулі, присвяченому теорії графів, дерев та автоматів, провідне місце посідають прийоми покрокової анімації алгоритмів та симуляції формальних моделей. Візуалізація має динамічний характер: студенти спостерігають не статичне зображення графа, а процес виконання алгоритму на ньому.

Інтерактивне середовище GraphVisual застосовуються для покрокової демонстрації виконання базових алгоритмів обходу графів, пошуку найкоротших шляхів та побудови мінімального остовного дерева. Для подолання ілюзії розуміння керування швидкістю анімації поєднується з обов'язковим ручним розрахунком студентом наступного стану вершин та ребер у робочому зошиті.

Прийоми розв'язання геометричних та оптимізаційних задач на графах реалізуються в GeoGebra при моделюванні задач комівояжера та побудові мінімальних остовних дерев. З позицій теорії подвійного кодування, використання GeoGebra для одночасного подання матриці суміжності та орієнтованого графа реалізує принцип поєднання вербального (символьного) та образного каналів.

GeoGebra містить потужний апарат для побудови комбінаторних графів:

Вершини графа $V = \{A, B, C, D, E\}$ створюються як вільні геометричні точки на площині, які студент може вільно переміщати мишею;

Ребра $E = \{\text{Segment}\ (A, B), \text{Segment}\ (B, C), \text{Segment}\ (A, D), \dots\}$ створюються як напрямлені відрізки або ребра;

Довжини ребер обчислюються автоматично як евклідові відстані $w = \text{Distance}\ (A, B)$ або задаються абстрактними ваговими коефіцієнтами через текст.

За допомогою команди Списку (List) та вбудованих матричних функцій GeoGebra формує динамічну матрицю суміжності A(G) та матрицю ваг W(G). При переміщенні вершин точок на площині топологія графа змінюється, але структурна матриця суміжності залишається інваріантною, що дозволяє студентам чітко розмежувати ізоморфізм графів та їх конкретне географічне/площинне розміщення.

Для вивчення алгоритму Дейкстри знаходження найкоротшого шляху у зваженому графі у GeoGebra створюється динамічний скрипт:

Контроль виконання**:** Створюється повзунок Step ∈ [1, N] із кроком 1, який контролює крок виконання алгоритму.

Візуальне підсвічування: На кожному кроці Step за допомогою команди

$$\text{If}(\text{Step} \geq k, \text{Color}(\text{Edge}, \text{Red}))$$

послідовно виділяються вершини з мінімальною тимчасовою позначкою та ребра, включені до найкоротшого дерева. Поруч із кожною вершиною виводиться динамічний текст $\text{Text}(+\text{Name}+) = " + d_{val})$, який оновлюється при кожній релаксації ребра.

Скінченний автомат у GeoGebra моделюється у вигляді орієнтованого графа станів. Стани відображаються колами S_0, S_1, S_2 (початковий стан виділяється вхідною стрілкою, заключні стани — подвійним колом). Переходи між станами моделюються орієнтованими дугами із динамічними мітками вхідних символів a, b.

За допомогою текстового поля введення вхідного ланцюжка (наприклад, *w* = "*abbaba*") та динамічного кнопочного скрипту («Крок вперед») активний стан автомата послідовно змінює колір на яскраво-жовтий. Студент бачить покроковий процес зчитування кожного символу вхідного слова та підсумкову фіксацію: допущено ланцюжок автоматом чи відхилено.

У свою чергу, симулятор finsm.io *(Dutton, 2024).* використовується для графічного проектування детермінованих і недетермінованих скінченних автоматів, симуляції зчитування ланцюжків символів та подальшого експорту графічних схем автоматів у код LaTeX для оформлення звітів.

Методична особливість цього модуля полягає в необхідності поєднання абстрактного опису алгоритму з його конкретним втіленням. Студент має спочатку передбачити, як поводитиметься алгоритм на заданому графі, потім реалізувати його в симуляторі та порівняти результат з передбаченням.

З позицій моделі APOS, покрокова візуалізація алгоритму Дейкстри дозволяє студентові перейти від етапу Action (виконання окремих кроків) до етапу Object (сприйняття алгоритму як цілісної структури). З позицій моделі Ван Хіле *.(Van Hiele, 1986),* це відповідає переходу від візуального розпізнавання до аналізу та неформальної дедукції.

Таблиця 4.

Додаткові засоби візуалізації для модуля 3

Інструмент	**Застосування**
Maxima	Графи
SageMath	Графи, скінченні автомати
Tinkercad Circuits	Емуляція Arduino: скінченні автомати
Wokwi	Симулятор Arduino: автомати, логічний аналізатор

Таблиця 5.

Приклади застосування засобів візуалізації на заняттях

Інструмент	**Модуль (тема)**	**Зміст діяльності студентів**
GeoGebra	1 (Операції над множинами)	Побудова динамічних діаграм Венна; введення множин A і B; спостереження за зміною перетину та об'єднання при зміні елементів.
Google Sheets	1 (Комбінаторика, Трикутник Паскаля)	Обчислення кількості комбінацій вручну; перевірка результату через команди; дослідження зростання кількості комбінацій при збільшенні числа елементів.
Penrose	1 (Бінарні відношення)	Генерація діаграми відношення з текстового опису; порівняння з матрицею суміжності.
RelCalculator	1 (Властивості відношень)	Введення матриці відношення; автоматична перевірка рефлексивності, симетричності, транзитивності.
Tinkercad Circuits	2 (Логічні перемикачі AND, OR, NOT)	Складання схем з перемиканням; заповнення таблиці істинності через фізичний експеримент.
LogicLearner	2 (Доведення рівносильності формул)	Покрокова побудова доведення; запит підказок за потреби; автоматична перевірка кожного кроку.
Wokwi	2 (Програмна реалізація булевих функцій)	Написання коду на C++, що реалізує булеву функцію через умовні оператори; підключення світлодіодів до виходів; порівняння з апаратною реалізацією.
GeoGebra	3 (Мінімальне остовне дерево)	Вставлення карти місцевості; позначення міст точками; застосування команди MinimumSpanningTree для знаходження мережі доріг мінімальної вартості.
GraphVisual	3 (Алгоритм Дейкстри, BFS та DFS)	Обчислення найкоротшого шляху вручну; запуск покрокової анімації; порівняння результату з власним розрахунком.
GraphVisual	3 (Алгоритм Дейкстри, BFS та DFS)	Побудова графа; запуск анімації обходу; спостереження за порядком відвідування вершин; порівняння стратегій BFS і DFS.
Tinkercad Circuits	3 (Скінченний автомат)	Програмування переходів між станами; спостереження за циклічною зміною.
Maxima	3 (Графи та ейлерові цикли)	Створення графа; перевірка наявності ейлерового циклу; візуалізація.

Систематичність застосування розробленого цифрового інструментарію та подолання фрагментарності його використання забезпечується шляхом інтеграції

всіх візуальних засобів у єдину електронну освітню екосистему на базі Moodle LMS, яка виступає центральним інфраструктурним хабом навчального процесу.

2. Методика персоналізованого та автоматизованого контролю знань у контексті міжпредметних зв'язків дискретної математики.

Персоналізація в методиці навчання дискретної математики реалізується через адаптацію змісту, темпу та рівня складності завдань до індивідуальних особливостей студентів. На практиці персоналізація забезпечується використанням систем автоматичної генерації завдань.

Numbas *(Шевченко, 2023; Shearman, 2024)* дозволяє створювати питання зі змінними, генеруючи унікальне питання для кожного студента.

PrairieLearn пропонує рандомізовані питання з миттєвим зворотним зв'язком та детальними розв'язками *(Ronanki, 2024).*

Google Sheets з функціями комбінаторики дозволяє студентові самостійно змінювати параметри задачі та спостерігати результат. Для модуля 3 персоналізація досягається через вибір студентом власного графа для реалізації алгоритму. Студент може самостійно визначити структуру графа (кількість вершин, наявність циклів, ваги ребер), що дозволяє йому досліджувати поведінку алгоритму в умовах, які він вважає цікавими або професійно релевантними.

Таблиця 6.

Приклади персоналізації навчання

Інструмент	**Модуль**	**Механізм персоналізації**
PrairieLearn	1	Кожен студент отримує власні числові дані для комбінаторної задачі; необмежена кількість спроб.
Numbas	2	Генерація унікальної булевої функції для кожного студента; введення відповіді (нормальної форми) у вигляді математичного виразу.
GraphVisual finsm.io	3	Студент обирає власний граф для дослідження (алгоритм Дейкстри); порівнює результати з різними вагами ребер. Студент будує скінченний автомат для власної мови; тестує різні вхідні рядки

Автоматизований контроль знань у методиці навчання дискретної математики виконує не лише оцінювальну, а й діагностичну та формувальну функції. Відбір засобів контролю здійснювався за тими самими критеріями, що й відбір інструментів візуалізації: безкоштовність, робота в браузері без встановлення, відповідність змістовим модулям.

Таблиця 7.

Засоби контролю знань для курсу дискретної математики

Інструмент	**Модуль**	**Дидактична функція**
Google Forms	1, 2, 3	Тести з автоперевіркою, миттєвий зворотний зв'язок, статистика.
Microsoft Forms	1, 2, 3	3 Тести з автоматичним оцінюванням, експорт в Excel.
Numbas	1, 2, 3	Математичні тести: рандомізація, математичні вирази як відповіді, інтеграція GeoGebra
Wayground (Quizizz)	1, 2, 3	Гейміфіковані тести, миттєвий зворотний зв'язок, аналітика.
Kahoot!	1, 2, 3	Ігрові вікторини, змагальний формат.
Socrative	1, 2, 3	Тести з різними типами питань, аналіз на рівні класу/студента.
Wordwall	1, 2, 3	Онлайн-вікторини з шаблонами (Match-Up, Group Sort, Quiz).
Faabul	1, 2, 3	Інтерактивні тести, до 30 учасників безкоштовно, QR-код для приєднання.
PrairieLearn	1, 2, 3	Рандомізовані питання, миттєвий зворотний зв'язок, необмежені спроби.
Mastery Learning App	1, 2, 3	Персоналізовані іспити для кожного студента, pass/fail оцінювання.
Discrete Mathematics Quizzer	1, 2, 3	Тисячі готових питань з дискретної математики.
Master of Logic	2	Таблиці істинності, рівносильність, ДФ, логічне слідування, критерій Поста.

Як видно з таблиць, найбільш універсальними є Google Forms, Microsoft Forms та Wayground, які покривають усі три модулі. Водночас Master of Logic займає унікальну позицію — це єдиний безкоштовний інструмент, створений виключно для алгебри висловлень, який має вбудовану перевірку критерію Поста. Numbas і PrairieLearn є найбільш спеціалізованими для математичних дисциплін завдяки підтримці рандомізації та математичних відповідей.

Таблиця 8.

Приклади застосування засобів контролю знань на заняттях

Інструмент	**Модуль**	**Дидактична функція**
Google Forms	1	Тест по комбінаториці із 10 завдань з числовою відповіддю; автоматична
Wayground (Quizizz)	1	Гейміфікований тест (Відношення та їх властивості) у режимі реального часу; аналітика на рівні окремих питань; зворотний зв'язок після кожного питання.
Kahoot!	1	Вікторина (Теорія множин, операції, діаграми Венна) з 5–7 питань наприкінці заняття; студенти відповідають з телефонів; миттєве визначення рівня розуміння.
PrairieLearn	1	Комбінаторика: Рандомізовані питання по комбінаториці: кожен студент отримує власні числові дані; необмежені спроби; детальні розв'язки після відповіді; перевірка; виявлення проблемних тем для наступного заняття.
LogicLearner	2	Доведення рівносильності: Покрокова побудова доведення; система вказує на помилковий крок; студент самостійно виправляє міркування.
PrairieLearn	3	Алгоритми на графах: рандомізовані графи для кожного студента; завдання на побудову матриці суміжності; необмежені спроби; миттєвий зворотний зв'язок.
Discrete Mathematics Quizzer	3	Графи, дерева: використання готових питань з тисяч варіантів; самостійна робота студентів у власному темпі.
GraphVisual	3	Студенти обчислюють шлях вручну, потім запускають анімацію; порівняння результату; виявлення помилок у міркуваннях.

Наведені в таблиці 6 приклади демонструють, що засоби контролю знань мають чітке дидактичне призначення. Kahoot! та Wayground забезпечують гейміфіковане формувальне оцінювання; Google Forms і Microsoft Forms — базові тести з автоперевіркою; PrairieLearn і Numbas *(Tran, 2026)* — рандомізовані математичні завдання; Master of Logic — спеціалізовану перевірку логічних міркувань; LogicLearner — покрокову перевірку доведень.

Тестова система Numbas є спеціалізованим інструментом оцінювання знань із математичних дисциплін, який забезпечує відкритість, алгоритмічну

гнучкість та дотримання принципів академічної доброчесності. Основна перевага Numbas полягає у підтримці алгоритмічної генерації змінних за допомогою внутрішньої мови JAMDB/JME, що дозволяє створювати унікальні числові, символьні та графічні варіанти завдань для кожного здобувача вищої освіти.

На відміну від стандартних тестів із множинним вибором, Numbas *(Лотюк, 2025; Rowlett, 2025)* аналізує відповіді у вигляді математичних виразів, оцінюючи їхню математичну еквівалентність, а не лише точний синтаксичний збіг рядків. Система легко інтегрується в електронний навчальний курс на базі Moodle LMS через протоколи LTI та SCORM, передаючи бали безпосередньо у журнал оцінок.

Методика контролю для модуля 1 будується на завданнях, що перевіряють здатність до перекодування між репрезентаціями. Наприклад, студент отримує матрицю суміжності та має побудувати відповідний граф, або навпаки — за графом відновити матрицю. Такі завдання перевіряють не просто знання означень, а розуміння структурних зв'язків між різними формами подання інформації.

Для модуля 2 контроль спрямований на перевірку навичок доведення та еквівалентних перетворень. Master of Logic забезпечує автоматичну перевірку правильності доведення покроково, виявляючи конкретний крок, на якому студент припустився помилки. LogicLearner надає можливість практикувати доведення з миттєвим зворотним зв'язком.

У модулі 3 контроль набуває форми перевірки алгоритмічних навичок. Студент має не лише знати визначення алгоритму, а й продемонструвати його виконання на конкретному графі. GraphVisual дозволяє автоматизувати перевірку проміжних кроків алгоритму.

Автоматизований контроль методично доцільно використовувати для самоперевірки студентів та поточного моніторингу, тоді як підсумкове оцінювання має включати комбіновані форми з усним компонентом.

Розглянуті компоненти методики не існують ізольовано — вони утворюють цілісну систему, у якій кожен елемент підсилює інші. Візуалізація створює образну основу для розуміння абстрактних понять; персоналізація забезпечує відповідність завдань рівню підготовки студента; автоматизований контроль надає своєчасний зворотний зв'язок, який інформує студента про його прогрес та визначає напрямки подальшої роботи.

Така інтеграція реалізує принцип «візуалізація → дія → рефлексія». Студент спочатку спостерігає візуалізацію поняття або алгоритму, потім самостійно виконує дію з цим об'єктом (будує, змінює, обчислює), і нарешті отримує автоматизований зворотний зв'язок, який дозволяє йому оцінити правильність своїх дій та скоригувати ментальну модель.

Таблиця 9.

Інтеграція засобів візуалізації та контролю за змістовими модулями

Модуль	**Візуалізація**	**Контроль знань**	**Форма заняття**
1	GeoGebra, RelCalculator, Penrose, Google Sheets	Google Forms, Kahoot!, Wayground, PrairieLearn	Перевернутий клас
2	Tinkercad, Wokwi, LogicLearner	Master of Logic, PrairieLearn, Numbas, LogicLearner	Гібридне навчання з скаффолдингом
3	GraphVisual, finsm.io, GeoGebra	Numbas, Kahoot!, PrairieLearn, GraphVisual	Навчання через дію

Як видно з таблиці 9, кожен модуль має свій набір інструментів, але всі вони підпорядковані єдиній логіці — від візуалізації через дію до рефлексії.

Запропонована методика може реалізовуватися в різних організаційних формах, вибір яких залежить від конкретних умов навчального процесу. Найбільш ефективною формою для реалізації принципів візуалізації, персоналізації та автоматизованого контролю є перевернутий клас, який дозволяє вивільнити аудиторний час для активної роботи з інтерактивними інструментами.

У моделі перевернутого класу для групових занять студенти самостійно опановують теоретичний матеріал через відеолекції та інтерактивні ресурси, а

аудиторний час присвячується практичній роботі: побудові графів, програмуванню алгоритмів, доведенню теорем з використанням цифрових інструментів. Викладач виконує роль консультанта та фасилітатора, допомагаючи студентам долати конкретні труднощі.

Для модулів, які потребують значної частки самостійної роботи, ефективною є також модель гібридного навчання з проблемним скаффолдингом. У цій моделі студенти отримують проблемні завдання (наприклад, довести властивість відношення або побудувати автомат за заданою мовою) та покрокову підтримку у вигляді підказок і проміжних завдань.

З позицій когнітивного наставництва, організаційні форми занять мають забезпечувати поступовий перехід від демонстрації (моделювання) через спільне виконання (коучинг, скаффолдинг) до самостійної роботи (дослідження).

Методика навчання дискретної математики для здобувачів спеціальності «Кібербезпека» *(Бабала, 2025)* набуває особливої ефективності за умови системної реалізації міжпредметних зв'язків *(Шевченко, 2026)*. Дискретна математика виступає фундаментальною базою для багатьох професійно орієнтованих дисциплін, і усвідомлення студентами цих зв'язків суттєво підвищує мотивацію та глибину засвоєння матеріалу.

Модуль 1. Теорія множин, відношень та комбінаторики має безпосередній вихід на такі дисципліни, як «Теорія ймовірностей та математична статистика» (комбінаторні методи обчислення ймовірностей), «Криптографія» (комбінаторні принципи побудови шифрів, підрахунок кількості можливих ключів) *(Bunde, 2024),* «Аналіз алгоритмів» (оцінка складності комбінаторних алгоритмів). Теорія відношень лежить в основі моделювання доступу в системах розмежування прав. Формальні алгоритми розподілу авторизації на основі реляційної алгебри використовуються в

системах рольового управління доступом (RBAC) для перевірки конфліктів ролей при призначенні прав користувачам.

Модуль 2. Алгебра логіки та булева алгебра є теоретичним фундаментом для дисциплін «Архітектура комп'ютерів» (проєктування логічних схем, суматорів, тригерів), «Програмування» (умовні конструкції, побітові операції), «Криптографія» (булеві функції в потокових шифрах, S-бокси в блокових шифрах), «Теорія інформації та кодування» (завадостійке кодування на основі булевих функцій). Дослідження підтверджують, що булева алгебра є критично важливою для шифрування даних, перевірки автентичності користувачів та запобігання несанкціонованому доступу. Сучасні дослідження також демонструють застосування булевої алгебри для побудови детермінованих та інтерпретованих систем виявлення фішингових URL у реальному часі.

Модуль 3. Теорія графів, дерев та автоматів є найбільш безпосередньо пов'язаним із професійною діяльністю фахівця з кібербезпеки. Графові моделі застосовуються для проведення аудиту інформаційної безпеки критично важливих об'єктів. Зокрема, розроблено багаторівневу топологічну модель аудиту, яка враховує витрати ресурсів, рівні вразливості та потенційну шкоду, а для визначення найбільш економічно ефективних сценаріїв тестування застосовується алгоритм найкоротшого шляху Дейкстри. Графовий підхід дозволяє розглядати мережу як взаємопов'язане середовище, в якому зловмисник обирає шлях найменшого опору, комбінуючи множинні вразливості. Застосування алгоритму Дейкстри для ідентифікації оптимального шляху вторгнення з візуалізацією в Python надає інтуїтивні інструменти для оцінки стійкості мережі.

Теорія автоматів застосовується в системах виявлення вторгнень (IDS/IPS) для розпізнавання сигнатур атак та в аналізі протоколів. Автомат як математична модель дискретної динамічної системи дозволяє формально описувати поведінку мережевих протоколів та виявляти відхилення від нормальної поведінки.

Для реалізації міжпредметних зв'язків у навчальному процесі доцільно використовувати такі методичні прийоми:

При вивченні теорії графів студентам пропонуються задачі на побудову графа корпоративної мережі за заданою топологією та пошук найкоротшого шляху від точки входу зловмисника до критичного сервера. Такий підхід дозволяє студентові побачити, що алгоритм Дейкстри чи пошук у ширину — це не абстрактні вправи, а інструменти реального аналізу ризиків. Дослідження показують, що графові моделі дозволяють виявити приховані зв'язки між вузлами мережі та побудувати послідовність атаки, відстежуючи маршрут поширення загрози між інфікованими системами.

Студенти отримують завдання розробити програмний інструмент, який на основі графової моделі мережі обчислює метрики її вразливості (наприклад, кількість шляхів між вузлами, наявність критичних вузлів). Міждисциплінарний проєкт інтегрує знання з дискретної математики, програмування та основ кібербезпеки в одному проєкті.

При вивченні булевої алгебри доцільно розбирати реальні приклади атак (кейс-метод із реальними інцидентами), де вразливість виникала через логічну помилку в перевірці умов доступу. Студенти аналізують код, будують таблицю істинності для умови доступу та виявляють, за яких комбінацій вхідних даних перевірка дає хибний результат.

Для криптографічних застосувань принцип включень-виключень дозволяє обчислювати кількість булевих функцій та перестановок із заданими властивостями нелінійності та невиродженості, що відповідають шеннонівським поняттям конфузії та дифузії.

Таблиця 10.

Відповідність тем дискретної математики задачам кібербезпеки

Модуль	**Дискретна математика**	**Кібербезпека**
1	Операції над множинами	Розмежування прав доступу, політики безпеки, ACL.
1	Відношення та їх властивості	Матриці доступу, моделі RBAC/ABAC, формальні алгоритми розподілу авторизації.
1	Комбінаторика	Підрахунок простору ключів, оцінка стійкості паролів, аналіз криптографічних перестановок. Обчислення кількості булевих функцій із заданими криптографічними властивостями.
2	Булеві функції та таблиці істинності Побітові операції (AND, OR, XOR). Мінімізація булевих функцій	Аналіз умов доступу, аудит конфігурацій, виявлення фішингових URL. Криптографічні алгоритми, хеш-функції, потокові шифри. Оптимізація правил фільтрації, зменшення хибних спрацювань IDS.
3	Обхід графа (BFS, DFS) Найкоротший шлях (Дейкстра) Мінімальне остовне дерево Скінченні автомати (DFA/NFA)	Пошук критичних шляхів атаки, пріоритезація вразливостей, аудит безпеки. Планування сегментації мережі, мінімізація поверхні атаки. Сигнатурний аналіз трафіку, виявлення вторгнень, опис поведінки протоколів.

Дослідження в галузі кібербезпеки підтверджують ефективність графових методів для аналізу загроз. Графові моделі використовуються для візуалізації топології мережі та ідентифікації потенційних загроз. Для виявлення кампаній Advanced Persistent Threat (APT) застосовується структурний аналіз графів, який дозволяє виявляти характерні патерни латерального переміщення зловмисника на основі топологічних ознак. Графові нейронні мережі (GNN) у поєднанні з традиційними моделями машинного навчання демонструють покращення показників виявлення аномальних з'єднань у мережевому трафіку.

Для ефективної реалізації міжпредметних зв'язків у курсі дискретної математики для спеціальності «Кібербезпека» доцільно дотримуватися таких принципів:

Принцип випереджального ознайомлення: На початку вивчення кожного модуля викладач демонструє студентам, у яких професійних дисциплінах і яким чином використовуватиметься відповідний математичний апарат. Це створює «якір» для подальшого засвоєння матеріалу.

Принцип наскрізного проєкту: Протягом усього курсу студенти можуть вести один проєкт (наприклад, модель безпеки невеликої мережі), який поступово ускладнюється: від множинного опису компонентів (модуль 1) через логічні умови доступу (модуль 2) до графової моделі топології та аналізу шляхів атаки (модуль 3).

Доцільно організовувати бінарні заняття або консультації, на яких викладачі профільних дисциплін використовують графові моделі в своїх курсах.

Після кожного модуля студенти виконують коротке завдання на рефлексію: «Як отримані знання можуть бути застосовані у вашій майбутній професійній діяльності?» Це сприяє усвідомленому навчанню та формуванню професійної ідентичності.(Принцип рефлексії професійної значущості).

Кожен змістовий модуль курсу забезпечує теоретичний фундамент для цілком визначених професійних компетентностей: від моделювання систем доступу на основі теорії множин і відношень до аналізу шляхів латерального переміщення зловмисника на основі теорії графів та алгоритму Дейкстри. Реалізація міжпредметних зв'язків у методиці навчання дискретної математики дозволяє подолати характерний для багатьох студентів розрив між «абстрактною математикою» та «практичною кібербезпекою».

Висновки. Розроблена методика використання інтерактивних цифрових інструментів у навчанні дискретної математики базується на багаторівневій системі теорій, яка охоплює когнітивний, та методичний рівні. Когнітивний

рівень включає теорію подвійного кодування (Paivio), когнітивну теорію мультимедійного навчання (Mayer), модель APOS (Dubinsky) та теорію концептуального образу (Vinner). Методичний рівень охоплює когнітивне наставництво, теорію самокерованого навчання (SRL), компетентнісно-орієнтовану теорію просторів знань (CBKST), TPACK та модель Ван Хіле.

Методика охоплює три взаємопов'язані компоненти — візуалізацію, персоналізацію та автоматизований контроль — і реалізується диференційовано для кожного з трьох змістових модулів курсу. Для модуля теорії множин, відношень і комбінаторики пріоритетом є формування здатності до перекодування між різними репрезентаціями абстрактних структур. Для модуля алгебри логіки та булевої алгебри — встановлення зв'язку між символьними виразами та їх фізичною реалізацією в логічних схемах. Для модуля теорії графів, дерев і автоматів — розвиток алгоритмічного мислення через програмування та динамічну візуалізацію.

Інтеграція зазначених компонентів у цілісну методику дозволяє створити навчальне середовище, у якому студент не лише отримує знання, а й активно конструює їх через взаємодію з цифровими об'єктами, отримує своєчасний зворотний зв'язок та має можливість керувати власним навчальним прогресом.

Окремої уваги заслуговує реалізація міжпредметних зв'язків із дисциплінами професійної підготовки. Для здобувачів спеціальності «Кібербезпека» дискретна математика виступає не абстрактною теоретичною дисципліною, а безпосереднім інструментальним фундаментом для аналізу загроз, моделювання мереж, проєктування систем доступу та виявлення вторгнень. Професійно орієнтовані задачі, міждисциплінарні проєкти та кейс-метод дозволяють студентові побачити практичну значущість кожного математичного поняття, що суттєво підвищує мотивацію та глибину засвоєння матеріалу.

Подальшого дослідження потребує емпірична перевірка ефективності запропонованої методики в реальних умовах освітнього процесу закладу вищої

освіти, а також розробка системи професійно орієнтованих задач і проєктів, які б інтегрували дискретну математику з дисциплінами циклу професійної підготовки фахівців з кібербезпеки на всіх етапах навчання.

References:

Clark J. M., Paivio A. Dual Coding Theory and Education. *Educational Psychology Review*. 1991. Vol. 3, no. 3. P. 149–210. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01320076

Tall D., Vinner S. Concept image and concept definition in mathematics with particular reference to limits and continuity. *Educational Studies in Mathematics*. 1981. Vol. 12, No. 2. P. 151–DOI: https://doi.org/10.1007/BF00305619

Mayer, R. E. Cognitive Theory of Multimedia Learning. The Cambridge Handbook of Multimedia Learning, Cambridge University Press, 2005. DOI: https://psycnet.apa.org/doi/10.1017/CBO9780511816819.004

Mishra P., Koehler M. J. Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge. *Teachers College Record*. 2006. Vol. 108, No. 6. P. 1017–1054. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1467-9620.2006.00684.x

Clow D. An overview of learning analytics. *Teaching in Higher Education*. 2013. Vol. 18, No. 6. P. 683–695. DOI: https://doi.org/10.1080/13562517.2013.827653

Ronanki P. Building a Flexible Educational Assessment System with PrairieLearn Extensions : Master's thesis / Iowa State University. Ames, Iowa, 2024. 56 p. https://surl.li/mukmdf

Paivio A. Dual coding theory: Retrospect and current status. *Canadian Journal of Psychology*. 1991. Vol. 45, No. 3. P. 255–287. DOI: https://doi.org/10.1037/h0084295

Tran H. T. T. Enhancing spatial geometry education in high school through 3D printing technology and Tinkercad. International Journal of Mathematical Education in Science and Technology. 2026. DOI: https://doi.org/10.1080/0020739X.2026.2701753

Van Hiele P. M. Structure and Insight: A Theory of Mathematics Education. Orlando : Academic Press, 1986. 245 p. https://archive.org/details/structureinsight0000hiel

Cottrill J., Dubinsky E., Nichols D., Schwingendorf K., Thomas K., Vidakovic D. Understanding the limit concept: beginning with a coordinated process schema. *The Journal of Mathematical Behavior*. 1996. Vol. 15, No. 2. P. 167–192 https://surl.li/efnylk

Collins A., Brown J. S., Holum A. Cognitive apprenticeship: Making thinking visible. American Educator. 1991. Vol. 15, No. 3. P. 6–11, 38–46 https://surl.li/kjmtoo

Nguyen Minh Giam. A Theoretical Framework for Integrating Artificial Intelligence in Teaching Based on the TPACK Model: A New Approach and Implications for Developing Teacher Competencies. *Journal of Social Science and Human Research Studies*. 2025. Vol. 1, no. 6. P. 283–288. https://doi.org/10.65150/EP-jsshrs/V1E6/2025-09

Deb J. P., Sofal F. A. TPACK to I-TPACK: A Systematic Analysis of I-TPACK (Integrating Intelligence or Artificial Intelligence with Technological Pedagogical Content Knowledge). *International Journal of Emerging Voices in Education*. 2026. Vol. 2, issue 1. P. 1–11. https://doi.org/10.59828/ijeve.v2i1.26

Hohenwarter M., Preiner J. Dynamic Mathematics with GeoGebra. *The Journal of Online Mathematics and Its Applications*. 2007. Vol. 7. Article ID 1448. https://surl.li/ztxlws

Dutton L., et al. A Web App for Teaching Finite State Automata. *arXiv*. 2024. arXiv:2410.12115. URL: https://arxiv.org/abs/2410.12115 .

Mushak A., Khoma N. Formation of mathematical and algorithmical competences of future digital technology specialists using structural modeling. *Перспективи та інновації науки*. 2026. № 5(59). С. 2602–2618. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-5(59)-2602-2618 .

Kerins B., Yong D., Cuoco A., Stevens G., Pilgrim M. Fractions, Tilings, and Geometry. Providence, RI : American Mathematical Society, 2017. 159 p. https://surl.li/zwanqc

Alvarado-Zamora L. N., et al. The Teaching-Learning of Relations in Discrete Mathematics Using Software as a Support. *2017 5th International Conference in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT)*. IEEE, 2017. https://doi.org/10.1109/CONISOFT.2017.00033

Чемерис О., Прус А., Фонарюк О. Майстерня GeoGebra: практичний підхід до візуалізації математики : методичні рекомендації. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. 46 с. https://eprints.zu.edu.ua/41691/1/1.pdf

Чемерис О. А., Мельник А. В. STEM-інструментарій для дискретної математики: практичний вимір. *Вісник науки та освіти*. 2026. № 5 (47). С. 5222–5237. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6165-2026-5(47)-5222-5237 .

Бойко А., Гетманюк О., Громяк М. Використання GeoGebra у процесі навчання дисциплін математичного циклу. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Педагогіка*. 2025. № 31. С. 16–20. https://doi.org/10.32626/2307-4507.2025-31.16-20

Кучерук В., Кулаков П., Ліман В. Онлайн-сервіс WOKWI як симулятор мікропроцесорних систем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. № 2. С. 153–158. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-19

Гайдусь А., Олефіренко Н. Використання віртуальної платформи Wokwi для навчання основ мікропроцесорної техніки майбутніх учителів інформатики в умовах дистанційного навчання. *Новий Колегіум*. 2024. № 1. С. 45–50. URL: https://surli.cc/iaimuc

Inamdar A., Macar U., Vazirani M., Tarnow M., Mustapha Z., Dittren N., Sadeh S., Verma N., Salleb-Aouissi A. LogicLearner: A Tool for the Guided Practice of Propositional Logic Proofs. *ArXiv*. 2025. Vol. abs/2503.19280. URL: https://arxiv.org/abs/2503.19280

Любченко К. М., Триус Ю. В. Елементи математичної логіки з комп'ютерною підтримкою : посібник для вчителів. Черкаси : Видавничий відділ ЧНУ, 2004. 88 с. ISBN 966-7986-72-1 https://share.google/g1qAUGjmEV9SUMfeN

Lyubchenko K. M. The Use of Instrumental and Controlling Program Master of Logic for Solving the Basic Class Problems of Propositional Algebra: Didactic Aspect. *American Journal of Educational Research*. 2013. Vol. 1, No. 11. P. 555–560. https://doi.org/10.12691/education-1-11-17.

Yilmaz Aslan B., Doğan Y., Özmusul B., Batdı V. GeoGebra in Mathematics Education: Bridging Theory and Practice for Sustainable Digital Learning. *SAGE Open*. 2026. Vol. 16, no. 1. P. 1–17. https://surl.lt/bfdlkk

Siregar T. Application of GeoGebra for Teaching Mathematics. *Zenodo Open Repository*. 2025. Vol. 1, no. 3. P. 1–12. https://www.preprints.org/manuscript/202510.0648/v1/download

Шевченко, Л. С., Уманець, В. О., & Розпутня, Б. М. (2023). Використання платформи arduino у підготовці вчителів інформатики за принципами stem навчання. *Електронне наукове фахове видання "Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету"*, (15), 130–138. https://doi.org/10.28925/2414-0325.2023.1510

Shearman D., Aziz S., Pettigrew J. Development and Analysis of a Numbas Diagnostic Tool for Use in a Mathematics Refresher Program. *MSOR Connections*. 2024. Vol. 22, No. 3. DOI: https://doi.org/10.21100/msor.v22i3.1479.

Методичні засади використання Arduino у розвитку технічного мислення здобувачів освіти / Ю. Г. Лотюк, В. І. Юскович-Жуковська, Л. Я. Соловей, С. В. Близнюк. *Вісник Міжнародного економіко-гуманітарного університету імені Академіка Степана Дем'янчука. Серія: Педагогіка та психологія*. 2025. № 1. DOI: https://doi.org/10.32782/3041-2021/2025-1-12

Rowlett P., Graham C., Lawson-Perfect C. Demonstration of a Partially Automated Assessment Approach to Create an Individualised, Open-Ended Modelling Worksheet. *International*

Journal of Mathematical Education in Science and Technology. 2025. Vol. 56, No. 4. P. 788–799. DOI: https://doi.org/10.1080/0020739X.2023.2289068.

Бабала Л. Дискретна математика в правовому аналізі: графове моделювання трансформації нормативно-правової архітектури національної системи кібербезпеки. *Informatics & Mathematical Methods in Simulation*. 2025. Т. 15, № 4. С. 507. https://doi.org/10.15276/imms.v15.no4.507

Шевченко С., Жданова Ю., Неходенко О. Модель формування когнітивних навичок спеціалістів з кібербезпеки засобами дискретної математики. *Освіта в умовах цифрової трансформації*. 2026. Вип. 1. С. 119–129. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.973

Bunde D. P., Dooley J. F. Cryptology as a Way to Teach Advanced Discrete Mathematics. *PRIMUS*. 2024. Vol. 34, No. 1. P. 41–53. https://doi.org/10.1080/10511970.2023.2222274

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-291
UDC 364.62:37.018.1:004

CHAPTER 9.
INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF SOCIAL WORK FOR THE PREVENTION OF CYBERBULLISHING IN THE STUDENT ENVIRONMENT OF GENERAL SECONDARY EDUCATION INSTITUTIONS

Liudmyla KRYMCHAK
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Social Work
and Management of Social Processes,
Oles Honchar Dnipro National University,
(72, Nauky Ave., Dnipro, 49000, Ukraine)
l.krymchak308@ukr.net
https://orcid.org/0009-0006-9624-2953

Abstract. The section of the monograph examines the current state of the problem of cyberbullying in the student environment of secondary education institutions in Ukraine. The essence, types, roles of participants, socio-psychological determinants and consequences of online aggression are analyzed. The role of a social work specialist (social educator) in the system of digital violence prevention is revealed. Innovative technologies of social work («Digital Safety Navigator», «peer-to-peer», forum-theater, «Digital Diary of Emotions and Safety», recovery circles with elements of a trauma-informed approach) are substantiated and systematized, adapted to the conditions of martial law, distance and blended learning. The need to take into account the manifestations of PTSD in participants in the educational process is emphasized. An algorithm for implementing technologies in the practice of educational institutions is proposed. The practical significance lies in the possibility of using the developed tools by social educators to create a safe digital educational environment.

Keywords: cyberbullying, social work, innovative technologies, prevention, educational environment, martial law, trauma-informed approach.

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СОЦІАЛЬНОЇ РОБОТИ З ПРОФІЛАКТИКИ КІБЕРБУЛІНГУ В УЧНІВСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗАКЛАДІВ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ

Анотація. У розділі монографії досліджено сучасний стан проблеми кібербулінгу в учнівському середовищі закладів загальної середньої освіти України. Проаналізовано сутність, види, ролі учасників, соціально-психологічні детермінанти та наслідки онлайн-агресії. Розкрито роль фахівця із соціальної роботи (соціального педагога) у системі профілактики цифрового насильства. Обґрунтовано та систематизовано інноваційні технології соціальної роботи

(«Цифровий навігатор безпеки», «рівний – рівному», форум-театр, «Цифровий щоденник емоцій та безпеки», відновні кола з елементами травмоінформованого підходу), адаптовані до умов воєнного стану, дистанційного та змішаного навчання. Підкреслено необхідність урахування проявів ПТСР у учасників освітнього процесу. Запропоновано алгоритм впровадження технологій у практику закладів освіти. Практичне значення полягає в можливості використання розроблених інструментів соціальними педагогами для створення безпечного цифрового освітнього середовища.

Ключові слова: кібербулінг, соціальна робота, інноваційні технології, профілактика, освітнє середовище, воєнний стан, травмоінформований підхід.

Вступ. У сучасному цифровому суспільстві кібербулінг став однією з найбільш поширених і небезпечних форм агресії серед учнів закладів загальної середньої освіти. Швидке поширення соціальних мереж, месенджерів та онлайн-платформ створило нові умови для психологічного насильства, яке часто залишається прихованим від педагогів, батьків і фахівців із соціальної роботи. Наслідки такого явища – зниження самооцінки, тривожність, депресивні стани, соціальна ізоляція, погіршення навчальної успішності та, у найтяжчих випадках, суїцидальні наміри – роблять дану проблему не лише педагогічною, а й соціальною.

Переконливим свідченням цього є сучасні статистичні дані. Зокрема, за результатами національного дослідження *(Sense Research, 2026)*, проведеного за підтримки ГО «Dignity Online», 54% школярів віком 6–17 років протягом останнього року стикалися з проявами кібербулінгу. Водночас 35,1% опитаних учнів зізналися, що самі брали участь в онлайн-цькуванні однолітків (найчастіше – через виключення з чатів, образливі повідомлення та принизливі коментарі). Крім того, офіційна статистика Національної поліції України також фіксує зростання випадків булінгу, що підтверджується складанням *(Національна поліція України, 2025)* за ст. 173-4 КУпАП 285 адміністративних протоколів, з яких понад половину становили випадки з участю неповнолітніх.

Значущість і прагматична цінність обраної проблеми зумовлені кількома взаємопов’язаними чинниками:

- по-перше, традиційні методи профілактики булінгу виявляються недостатньо ефективними в цифровому просторі;

- по-друге, в умовах воєнного стану в Україні збільшується рівень психоемоційної напруги серед підлітків, що, у свою чергу, підвищує ризик агресивної поведінки онлайн;

- по-третє, система соціальної роботи в закладах освіти потребує сучасних, інноваційних технологій, здатних оперативно реагувати на прояви кібербулінгу та формувати безпечне освітнє середовище.

У цьому контексті соціальна робота виступає ключовим професійним інструментом, оскільки дозволяє поєднувати індивідуальну роботу з учнями, роботу з батьками, педагогічним колективом і громадою. Саме тому інноваційні технології соціальної роботи відкривають нові можливості для ефективної профілактики та раннього втручання.

Виходячи з цього, мета дослідження полягає в теоретичному обґрунтуванні та розробці інноваційних технологій соціальної роботи з профілактики кібербулінгу в учнівському середовищі закладів загальної середньої освіти.

Для успішного досягнення поставленої мети було послідовно визначено такі завдання: проаналізувати сучасний стан проблеми кібербулінгу в освітньому середовищі; розкрити роль соціальної роботи в системі профілактики цифрового насильства; а також визначити та обґрунтувати інноваційні технології соціальної роботи, спрямовані на попередження та подолання кібербулінгу.

1. Сучасний стан проблеми кібербулінгу в освітньому середовищі.

Аналіз сучасного стану проблеми кібербулінгу в освітньому середовищі є неможливим без звернення до наукових праць, що розкривають сутність явища, його поширеність, детермінанти та наслідки. У вітчизняній і зарубіжній літературі вже сформувалося кілька провідних підходів до вивчення цього феномену.

У науковому дискурсі поняття кібербулінгу розглядається насамперед крізь призму його сутнісних відмінностей від традиційного цькування. Зокрема, у дослідженнях воно визначається як умисний систематичний психологічний тиск із використанням інформаційно-комунікаційних засобів для приниження чи залякування *(Лалюк, Г. М., 2021)*. Наслідками таких дій є втручання в приватне життя, порушення прав і заподіяння моральної чи матеріальної шкоди *(Сотніченко, Н. О., Данилевич, Л. А., 2024)*. Деякі дослідники трактують це явище як боротьбу за владу і домінування в цифровій сфері *(Грубі, Т. В., Купчишина, В. Ч., 2024)*, інші – як форму девіантної поведінки, спрямованої на цілеспрямоване завдання психологічної шкоди в онлайн-просторі *(Момот, О. В., 2017)*.

Розгляд означеної проблеми свідчить, що різноманітність способів здійснення онлайн-цькування зумовила формування численних видів цього явища, які відрізняються формами прояву та механізмами психологічного впливу на учня-жертву (табл. 1).

Таблиця 1

Основні види кібербулінгу в освітньому середовищі

Вид кібербулінгу	Особливості прояву
Харасмент	Систематичне надсилання образливих або погрозливих повідомлень через соціальні мережі та месенджери з метою психологічного тиску.
Кібер-переслідування	Тривале нав'язливе стеження за особою в цифровому середовищі, що супроводжується погрозами, контролем онлайн-активності та викликає почуття страху.
Розголошення конфіденційної інформації	Поширення особистих даних, приватних повідомлень або фотографій без згоди особи з метою її приниження чи дискредитації.
Тролінг	Розміщення провокаційних або образливих повідомлень з метою викликати конфлікт чи психологічний дискомфорт у потерпілого.
Флеймінг	Відкрита агресивна онлайн-комунікація з використанням образ, принижень та ненормативної лексики щодо конкретної особи.
Видавання себе за іншу особу	Використання чужого облікового запису або створення фальшивого профілю для поширення інформації від імені потерпілого з метою завдання шкоди його репутації та соціальним зв'язкам.
Обман та зловживання довірою	Встановлення довірливих стосунків з потерпілим для отримання особистої інформації з метою її подальшого розголошення, висміювання або шантажу.
Хепі-слепінг	Фото- чи відеофіксація насильства щодо особи з подальшим поширенням записів у цифровому середовищі з метою публічного приниження або дискредитації.
Соціальна ізоляція	Умисне виключення особи з онлайн-груп, чатів або спільнот з метою її соціальної ізоляції та формування відчуття неприйняття з боку однолітків.

На думку науковців *(Плетенчук, Р. С., Пакушина Л. З., 2019 та ін.)*, кібербулінг в освітньому середовищі можна поділити на індивідуальне (здійснення агресивних дій одним учнем щодо конкретно іншого), групове (здійснення цькування групою учнів, об'єднаних спільною метою психологічного впливу на жертву) та змішане (поєднання індивідуального та групового переслідування, за якого до агресивних дій, ініційованих одним учнем, долучаються інші учасники) явище.

Вивчення сучасного стану проблеми кібербулінгу в освітньому середовищі показує, що в процесі онлайн-цькування учні виконують різні ролі, кожна з яких характеризується специфічними поведінковими проявами та особливостями взаємодії в цифровому середовищі (табл. 2).

Таблиця 2

Основні ролі учасників кібербулінгу в освітньому середовищі

Роль	**Тип поведінки**
Агресор	Ініціює та здійснює агресивні дії в цифровому середовищі з метою завдання психологічної шкоди іншому учневі.
Жертва	Зазнає систематичних агресивних дій; може уникати спілкування, блокувати агресора або приховувати факт цькування.
Свідок	Спостерігає за проявами кібербулінгу, але безпосередньо не бере участі в конфлікті.
Агресор-жертва	Одночасно є жертвою кібербулінгу та сам проявляє агресивну поведінку щодо інших.
Помічник агресора	Свідомо або опосередковано підтримує агресора (поширює контент, схвалює дії, залучає інших).
Захисник жертви	Займає активну просоціальну позицію: підтримує жертву, повідомляє про цькування, сприяє його припиненню.

Аналіз наукових джерел *(Wolak, J., Mitchell, K. & Finkelhor, D., 2007)* свідчить, що кібербулінг в освітньому просторі є затяжним процесом переслідування, адже завдає систематичної шкоди жертві поза часовими рамками та шкільними стінами. Водночас дослідження деяких науковців *(Olweus, D., 2001)* доводять психологічну спорідненість традиційного цькування та кібербулінгу. Зокрема, такі особистісні властивості агресорів, як прагнення домінувати, імпульсивність, емоційна лабільність і толерантність до агресії, однаковою мірою притаманні як офлайн-, так і онлайн-середовищу. З огляду на це, психологічний портрет учнів визначає їхню схильність до участі в цифровому насильстві, де основну групу ризику утворюють підлітки з дефіцитом емпатії, підвищеною імпульсивністю та потребою в домінуванні.

Зокрема, у працях дослідників *(Бурлака, А. А., Вольнова, Л. М., 2025; Гура, А., Содолевська, В., 2024; Давидюк, М. О., Музика, С. Д., 2025; Щербан, Т. Д., Греба, І. З., Бергхауер-Олас Е. Л., 2026)* комплексно виокремлено ключові детермінанти онлайн-агресії (рис. 1).

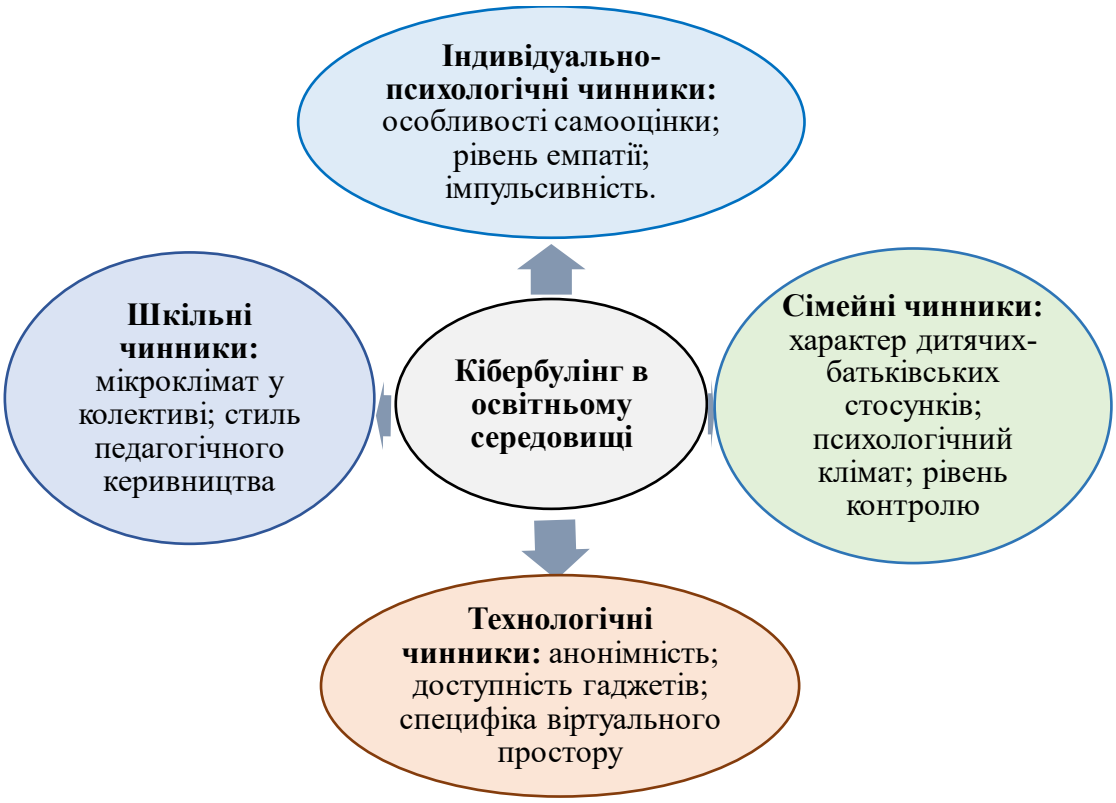

Рис. 1 Детермінанти онлайн-агресії

Крім того, на основі узагальнення наукових підходів можна виокремити основні моделі поведінки кібербулерів (агресорів), які відображають їхні мотиви та специфіку дій (табл. 3).

Таблиця 3

Основні моделі поведінки кібербулерів

Модель поведінки	Характеристика
Домінантно-агресивна	Прагнення до влади, контролю та домінування через образи, погрози й приниження з метою самоствердження, підвищення статусу та демонстрації переваги над жертвою.
Розважально-деструктивна	Вчинення агресивних дій заради розваги, емоцій чи привернення уваги, коли булер сприймає їх як невинний жарт, ігноруючи наслідки для постраждалого.
Реактивно-агресивна	Виникнення агресії через образу чи конфлікт, коли булер використовує цифрові технології як інструмент помсти чи відновлення гідності за пережиті раніше негативні емоції.
Конформна	Поведінка, зумовлена впливом оточення та прагненням отримати схвалення групи чи уникнути власного цькування.
Компенсаторна	Компенсація власних психологічних проблем, невпевненості чи низької самооцінки через приниження інших для тимчасового підвищення власної значущості.

Важливою складовою аналізу сучасного стану проблеми є вивчення деструктивних наслідків цього явища для всіх учасників освітнього процесу, адже кібербулінг не обмежується лише цифровим простором, а виходить далеко за його межі, спричиняючи системну дезорганізацію особистісного розвитку підлітків. Науковці *(Лещенко, О. Г., Тимчишин, І. В., 2024 та ін.)* систематизували ці наслідки за чотирма ключовими рівнями:

- соціальним, який пов'язаний з руйнуванням міжособистісних контактів, соціальною ізоляцією та втратою довіри до оточуючих;
- психологічним, коли виникають тривожно-депресивні стани, відбувається розвиток посттравматичних розладів, знижується самооцінка та з'являються суїцидальні ідеї;
- педагогічним, що веде до суттєвого зниження академічної успішності, втрати мотивації до навчання та формування шкільної фобії;
- фізіологічним, коли з'являються психосоматичні порушенння, головний біль, розлади сну та хронічний стрес.

Спираючись на аналіз психолого-педагогічної літератури можна виділити дві категорії учнів, які найчастіше потрапляють до груп ризику віктимізації. Першу групу становлять підлітки з низькою цифровою грамотністю, емоційною реактивністю та невмінням захищати власні кордони. До другої, належать учні з високими навчальними досягненнями, лідерськими якостями та активною позицією. У другому випадку агресія зазвичай зумовлена заздрощами, суперництвом і прагненням кривдників самоствердитися за рахунок зниження соціального статусу успішнішої особистості. Виявлення обох категорій ризику є ключовим завданням для превентивної практики фахівців із соціальної роботи (ФСР)/соціальних педагогів.

Отже, кібербулінг в освітньому середовищі – явище, яке є складним, багатофакторним і динамічним. Воно поєднує ознаки традиційного психологічного насильства з можливостями цифрових технологій, що робить його особливо небезпечним для учнів закладів загальної середньої освіти.

Багатофакторна природа кібербулінгу доводить неможливість подолання цього явища за допомогою точкових заходів. Це вимагає розробки та впровадження системного, комплексного підходу до соціальної профілактики в закладах загальної середньої освіти, який має гармонійно поєднувати роботу з особистістю учня, його родинним оточенням, шкільним мікрокліматом та цифровим середовищем за безпосередньої участі ФСР/соціальних педагогів, що безпосередньо зумовлює визначення та детальний аналіз ключових напрямів, методів і завдань у межах наступного розділу.

2. Роль соціальної роботи в системі профілактики цифрового насильства.

Соціальна профілактика цифрового насильства – це система заходів, спрямованих на попередження виникнення, поширення та повторення випадків кібербулінгу, усунення чинників, що сприяють його проявам, формування безпечної поведінки в цифровому середовищі та захист прав учасників освітнього процесу.

Водночас практичним інструментом реалізації цього процесу є соціальна робота в системі профілактики цифрового насильства, яка визначається як системна діяльність фахівців із соціальної роботи/соціальних педагогів, що спрямована на запобігання виникненню, поширенню та повторенню випадків кібербулінгу серед здобувачів освіти, нейтралізацію детермінантів онлайн-агресії, формування культури безпечної поведінки в цифровому просторі, а також на захист прав і відновлення порушених зв’язків учасників освітнього процесу в умовах сучасних викликів і воєнного стану.

Не зважаючи на те, що соціальну профілактику в закладі загальної середньої освіти здійснює мультидисциплінарна команда фахівців, кожен із яких має чітко визначені функціональні обов’язки, ключовим координатором превентивної системи в школі є соціальний педагог (фахівець з соціальної роботи). На відміну від психолога, він фокусується на соціальному середовищі, міжособистісних стосунках, родинному кліматі та міжвідомчій взаємодії.

Здійснює діагностику груп ризику, проводить просвітницьку роботу з учнями, батьками та педагогами, організовує заходи та координує реагування на кризові ситуації.

Характерною ознакою системи соціально-профілактичної діяльності в закладах загальної середньої освіти є те, що вона ґрунтується на загальновизнаних методологічних принципах (табл. 4).

Таблиця 4

Методологічні принципи соціально-профілактичної діяльності в закладах загальної середньої освіти

Принцип	**Зміст принципу в контексті профілактики кібербулінгу**
Системності	Розгляд профілактичної діяльності як цілісної системи взаємопов'язаних елементів (діагностика, просвіта, консультування, корекція, моніторинг), а не окремих заходів.
Комплексності	Охоплення всіх рівнів профілактики (первинної, вторинної, третинної) та учасників освітнього процесу (учнів, батьків, педагогів, адміністрації).
Превентивності	Пріоритет попередження кібербулінгу над реагуванням на вже вчинені випадки з акцентом на формування безпечної поведінки та цифрової культури.
Міжвідомчої взаємодії	Координація зусиль закладу освіти зі службами у справах дітей, кіберполіцією, психологічними службами, громадськими організаціями та місцевим самоврядуванням.
Суб'єкт-суб'єктної взаємодії	Учні як активні учасники профілактики (технологія «рівний-рівному», учнівське самоврядування, спільна розробка правил цифрової безпеки).

Згідно із Законом України «Про соціальні послуги» *(Про соціальні послуги: Закон України, 2019)* та профільним державним стандартом соціальної послуги профілактики *(Про затвердження Державного стандарту соціальної послуги профілактики: Наказ Міністерства соціальної політики України, 2015)*, діяльність фахівця із соціальної роботи (ФСР)/соціального педагога має виражений превентивний характер і спрямована на запобігання потраплянню особи в складні життєві обставини. В умовах закладу загальної середньої освіти (ЗЗСО) це передбачає створення такого середовища, за якого випадки

кібербулінгу або попереджаються на етапі передумов, або своєчасно припиняються.

З огляду на це, ефективна діяльність ФСР/соціального педагога у профілактичному вимірі традиційно спирається на три взаємопов'язані рівні:

Первинна профілактика, яка спрямована на всіх учнів і має на меті формування цифрової грамотності, навичок безпечної поведінки в мережі, емпатії, толерантності та відповідального ставлення до онлайн-комунікації. Саме цей рівень є найбільш ефективним, оскільки дозволяє попередити виникнення проблеми.

Вторинна профілактика, що орієнтована на учнів групи ризику та тих, хто вже стикався з окремими проявами онлайн-агресії. Вона передбачає своєчасне виявлення випадків кібербулінгу, роботу з потенційними агресорами та жертвами, а також запобігання ескалації конфлікту.

Третинна профілактика – здійснюється після того, як випадок кібербулінгу вже стався. Її завдання – мінімізувати негативні наслідки, надати підтримку жертві, провести корекційну роботу з агресором, відновити соціальні зв'язки та не допустити повторних випадків.

Реалізація окреслених рівнів превенції здійснюється через комплекс взаємопов'язаних напрямів соціальної роботи у сфері запобігання кібербулінгу в межах закладів загальної освіти:

- діагностично-прогностичний напрям, що передбачає систематичне моніторинг-дослідження психологічного клімату в класних колективах, виявлення рівня толерантності учнів, а також виявлення дітей із груп підвищеного ризику, зокрема агресорів, жертв та підлітків із конформною та компенсаторною моделями поведінки за допомогою стандартизованих опитувальників, соціометрії й проєктних методик;
- інформаційно-просвітницький напрям, спрямований на підвищення правової та цифрової обізнаності учнів, батьків і педагогів стосовно сутності

кібербулінгу, його адміністративної чи кримінальної відповідальності, а також правил кібергігієни й безпечного користування соціальними мережами;

- психокорекційний та реабілітаційний напрям, що охоплює надання адресних соціально-психологічних послуг підліткам, які постраждали від онлайн-цькування задля подолання наслідків тривожно-депресивних станів, посттравматичних розладів і відновлення самооцінки, а також корекційну роботу з підлітками, які виявляють деструктивні агресивні схильності;
- консультативно-посередницький напрям, який полягає в наданні кваліфікованої допомоги учням, батькам і вчителям у кризових ситуаціях та здійсненні посередництва або медіації у вирішенні шкільних і цифрових конфліктів.

Специфіка соціальної роботи в системі профілактики цифрового насильства полягає в тому, що об'єктом впливу стає не окрема девіантна дія, а складний комплекс соціально-психологічних, сімейних, шкільних та технологічних чинників. Відповідно, діяльність ФСР/соціальних педагогів має охоплювати три ключові вектори: роботу безпосередньо з учнівським колективом, взаємодію з педагогічним колективом та залучення батьківської громадськості.

Зокрема, у межах першого вектора – під час роботи з учнями ЗЗСО – фахівці використовують широкий спектр інтерактивних методів, які довели свою ефективність у превентивній практиці. До них належать:

тренінгові заняття та рольові ігри, що дозволяють підліткам на практиці відпрацювати навички впевненої (асертивної) поведінки, протистояння тиску групи, конструктивного вирішення конфліктів та емпатійного реагування. Очевидно, що рольове моделювання ситуацій кібербулінгу дає змогу учням «побути в ролі жертви» або «свідка», що формує нульову толерантність до насильства;

інтерактивні лекції, бесіди-дискусії та круглі столи, які сприяють критичному осмисленню інформаційного контенту, обговоренню реальних кейсів із наслідками цифрового цькування;

кіноестетичний метод (метод кінотерапії) – перегляд та колективне обговорення спеціалізованих документальних або художніх фільмів, присвячених проблемі цькування в мережі, з подальшим глибоким аналізом мотивів поведінки персонажів;

творчі та проєктні технології, під час яких відбувається залучення школярів до створення соціальної реклами, плакатів, буклетиків або відеороликів антибулінгового спрямування, що активізує їхню просоціальну позицію та перетворює з пасивних свідків на активних захисників.

Особлива увагу в процесі профілактики приділяється роботі зі свідками кібербулінгу, які утворюють найчисленнішу групу учнів. Саме позиція свідків найчастіше визначає динаміку цькування: якщо вони демонструють мовчазне схвалення або пасивно спостерігають, агресор відчуває безкарність.

Так, за даними дослідження Health Behaviour in School-aged Children (HBSC) під егідою ЮНІСЕФ *(ЮНІСЕФ, 2026)* в Україні **38%** підлітків були свідками кібербулінгу принаймні один раз протягом останніх шести місяців (з них **22%** спостерігали такі випадки регулярно – раз на місяць або частіше). Серед тих, хто став свідком онлайн-цькування:

- лише **27%** допомогли жертві;
- **22%** сказали агресору припинити;
- **19%** повідомили про випадок дорослим (батькам чи вчителям);
- значна частина (близько **36%**) взагалі не реагувала і залишалася пасивною.

Міжнародні дослідження також підтверджують ключову роль свідків:

- свідки присутні приблизно в **80%** випадків кібербулінгу;
- лише **11–19%** свідків активно втручаються на захист жертви;

– коли свідок все ж втручається, цькування у **57%** випадків припиняється протягом 10 секунд.

Зазначене вище переконливо показує, що свідки утворюють найчисленнішу групу учасників кібербулінгу, і саме їхня позиція (пасивне спостереження чи активне заступництво) значною мірою визначає, чи продовжуватиметься онлайн-агресія. Тому ФСР/соціальний педагог має формувати в учнівському середовищі ЗЗСО культуру небайдужості (перетворення свідків на заступників), навчаючи їх безпечним способам втручання та інформування дорослих.

Ефективність соціальної роботи у сфері запобігання цифровому насильству неможлива виключно через локальний вплив на учнівський колектив. Оскільки сімейні та шкільні чинники є потужними детермінантами кібербулінгу, система профілактики має охоплювати доросле оточення дитини – батьків та педагогів.

На рисунку 2 відображено алгоритм роботи ФСР/соціального педагога з батьками учнів ЗЗСО щодо профілактики кібербулінгу.

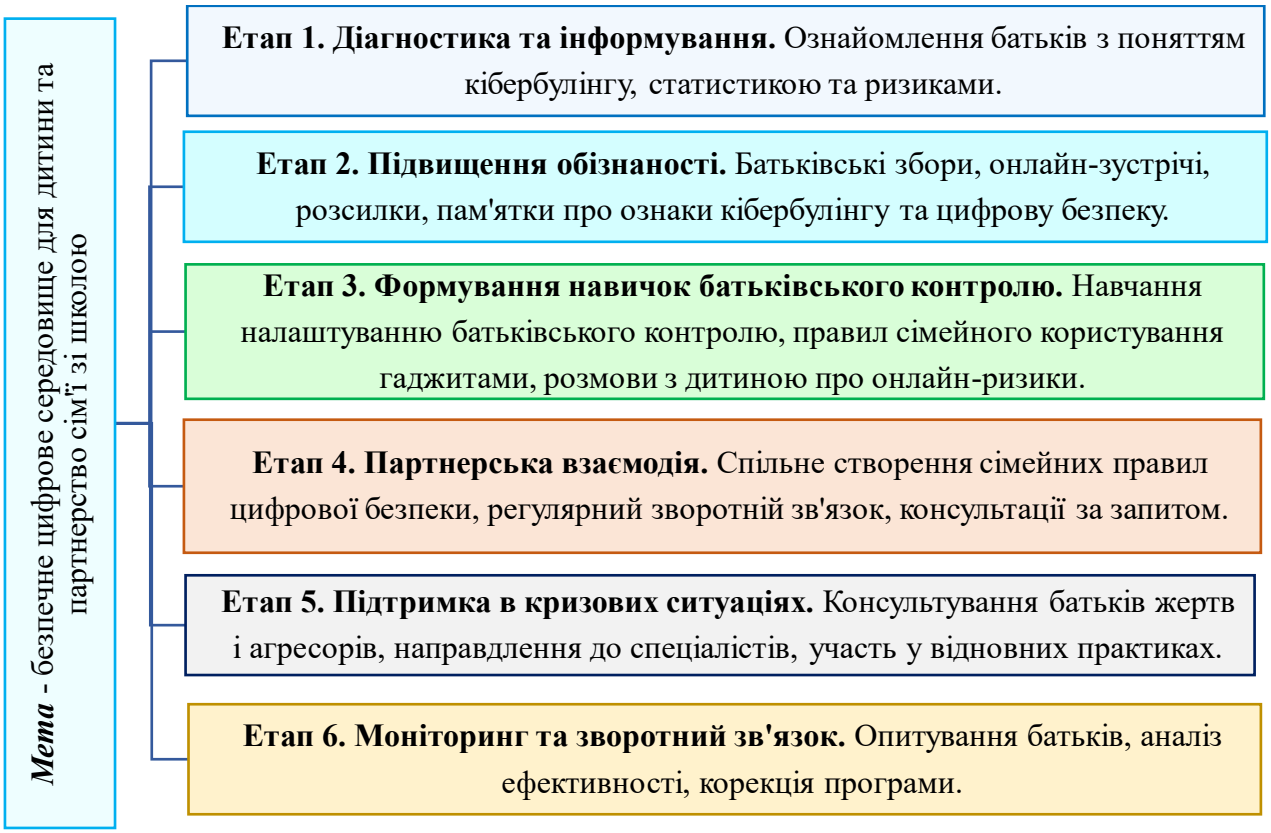

Рис. 2. Алгоритм роботи ФСР/соціального педагога з батьками учнів щодо профілактики кібербулінгу

Робота з батьками спрямована на подолання цифрового розриву між поколіннями, підвищення їхньої обізнаності щодо віртуальної активності дітей та гармонізацію дитячо-батьківських стосунків. Слід зазначити, що батьки часто недооцінюють небезпеку онлайн-простору або, навпаки, вдаються до тотального тоталітарного контролю, що лише посилює конфліктність і змушує підлітків приховувати свої проблеми. У межах соціально-педагогічної діяльності фахівці застосовують такі форми роботи з родинами:

- тематичні батьківські збори, тренінгові практикуми та вебінари з питань кібербезпеки;
- розробку інформаційних пам'яток та інструкцій щодо ознак того, що дитина стала жертвою або агресором у мережі;
- консультування батьків із приводу налагодження довірливого спілкування в родині та створення сприятливого психологічного клімату.

Немаловажну роль в соціально-профілактичній роботі відіграє і взаємодія фахівця з педагогічним колективом ЗЗСО, яка передбачає розвиток професійної компетентності вчителів щодо раннього виявлення маркерів кібербулінгу. Педагоги мають володіти навичками швидкого реагування на приховані форми цькування (ізоляція в чатах, різкі зміни поведінки учня на уроках, зниження успішності, демонстративна втома чи тривожність). Важливим аспектом є формування у вчителів усвідомлення власного стилю педагогічного керівництва, адже авторитарний чи індиферентний стиль з боку педагога часто провокує агресивні прояви в учнівському середовищі або формує атмосферу мовчання.

Зрозуміло, що масштабність та латентність кібербулінгу зумовлюють необхідність виходу за межі одного закладу освіти. З огляду на це, успішна соціально-профілактична діяльність неможлива без розбудови ефективної міжвідомчої взаємодії та застосування мультидисциплінарного підходу.

Як наслідок, єдина система запобігання та реагування на випадки цифрового насильства має комплексно об'єднувати зусилля таких структур та інституцій, як:

- фахівців із соціальної роботи та соціальних педагогів ЗЗСО;
- практичних психологів;
- керівництва шкіл та педагогічного складу;
- Служб у справах дітей та центрів соціальних служб;
- підрозділів ювенальної превенції Національної поліції України (особливо у випадках тяжких проявів харасменту, вимагання, погроз або поширення конфіденційних матеріалів);
- Громадських організацій та волонтерських ініціатив, що спеціалізуються на захисті прав дітей та протидії булінгу.

Водночас, на етапах третинної профілактики, критично важливим є саме залучення правоохоронних органів та соціальних служб, оскільки у випадках фіксації грубих порушень прав неповнолітніх неминуче виникає гостра потреба в юридичному захисті потерпілих чи правовому притягненні до відповідальності винних осіб.

Отже, проаналізовані матеріали засвідчують визначальну, координуючу роль соціальної роботи у превенції цифрового насильства в ЗЗСО. Продуктивна профілактика виходить далеко за межі епізодичних просвітницьких акцій, вимагаючи безперервної, комплексної взаємодії за участю здобувачів освіти, педагогів, батьківської спільноти та профільних партнерів.

Водночас сучасний стан проблеми кібербулінгу в освітньому середовищі України свідчить, що класичні форми превентивної роботи (бесіди, лекції, разові заходи) вже не забезпечують належної ефективності. Більш того, ситуація суттєво ускладнюється умовами воєнного стану, поширенням дистанційного й змішаного навчання, а також високим рівнем психоемоційного напруження і проявів посттравматичного стресового розладу (ПТСР) серед учнівської молоді.

3. Інноваційні технології соціальної роботи, спрямовані на попередження та подолання кібербулінгу.

Оскільки цифрове середовище змінюється швидше, ніж оновлюються класичні методи роботи, а онлайн-спілкування часто стає єдиним доступним простором соціальної взаємодії для дітей, які перебувають у різних регіонах або за кордоном, виникає об'єктивна необхідність у пошуку нових, дієвих підходів. З огляду на це, особливої актуальності набувають інноваційні технології соціальної роботи, спрямовані на попередження та подолання кібербулінгу, які здатні враховувати специфіку онлайн-комунікації, високу цифрову активність підлітків, особливості їхньої поведінки в мережі та додаткові ризики, пов'язані з війною і травматичним досвідом.

Дійсно, інноваційні технології соціальної роботи в контексті профілактики кібербулінгу – це система нових або значно вдосконалених методів, форм, засобів і процедур, спрямованих на попередження, своєчасне виявлення та подолання онлайн-агресії серед учнів закладів загальної середньої освіти. Зокрема, вони базуються на принципах інтерактивності, цифрової доступності, комплексності, травмоінформованого підходу та партнерської взаємодії.

При цьому інноваційність у соціальній роботі з кібербулінгом полягає не лише у використанні нових технічних засобів, а й у докорінній зміні самої логіки превентивної діяльності. Так, традиційна модель «інформування → заборона → покарання» поступається місцем сучасній парадигмі «розуміння → формування навичок → підтримка → відновлення». Більш того, в умовах війни ця модель суттєво доповнюється травмоінформованим підходом, який враховує, що як жертви, так і агресори кібербулінгу можуть мати прояви ПТСР, підвищену тривожність, емоційну лабільність або ж демонструвати агресію як захисний механізм опанування стресу.

Очевидно, що ключовими характеристиками інноваційних технологій є:

- орієнтація на розвиток життєвих навичок (цифрової грамотності, емпатії, саморегуляції, критичного мислення);
- активна участь самих учнів у профілактичному процесі;

– використання цифрових інструментів як середовища профілактики, а не лише як об’єкта впливу;

– можливість швидкого реагування та масштабування в умовах дистанційного чи змішаного навчання;

– поєднання індивідуальної, групової та середовищної роботи з урахуванням травматичного досвіду учнів.

У таблиці 5 відображені групи інноваційних технологій соціальної роботи, які ми пропонуємо для попередження та подолання кібербулінгу серед учнів загальноосвітніх закладів (з урахуванням стану та форматів навчання).

Таблиця 5

Групи інноваційних технологій соціальної роботи
з попередження та подолання кібербулінгу

№	Група	Зміст та форми реалізації	Обґрунтування
1	Освітньо-цифрові	Використання онлайн-платформ, інтерактивних курсів, мобільних додатків і чат-ботів.	Важливість інструментів в умовах дистанційного та змішаного навчання через військові дії для формування цифрової компетентності та кібергігієни поза межами школи.
2	Інтерактивно-тренінгові	Тренінги, воркшопи, форум-театри, рольові ігри та симуляції конфліктних ситуацій (проводяться як очно, так і в платформах Zoom/Meet).	Розвиток емоційного інтелекту й комунікації через рольові ігри, що формують нульову толерантність до насильства та навички реагування на булінг.
3	«Рівний – рівному»	Залучення учнів-лідерів, антибулінгових команд і волонтерів-підлітків до профілактичної та підтримуючої роботи.	Залучення шкільних лідерів для руйнування атмосфери мовчання та створення культури активного захисту завдяки високій довірі підлітків до однолітків.
4/	Медіаосвітні та арт-технології	Створення учнями власного контенту (відео, подкасти, комікси), аналіз реальних кейсів, використання елементів арт-терапії.	Трансформація споживачів інформації на творців антибулінгових сенсів; арт-методики для безпечного опрацювання прихованих емоцій і травм, зумовлених середовищем та стресом війни.

Продовження таблиці 5

5	Раннього виявлення та моніторингу	Анонімні цифрові скринінги, онлайн-опитування, системи зворотного зв'язку та алгоритми швидкого реагування.	Подолання латентності кібербулінгу та страху звернень за допомогою через анонімні інструменти для ранньої фіксації проблеми до ескалації.
6	Відновного та травмоінформованого підходу	Медіація, кола відновлення, робота з категорією «агресор-жертва», спрямовані на відповідальність і загоєння травм.	Фокус на усвідомленні наслідків і відновленні соціальних зв'язків замість деструктивного покарання для зниження вторинної травматизації в умовах кризи.

Далі зупинимося на кожній із зазначених вище груп технологій більш предметно.

Важливо розуміти, що перехід закладів загальної середньої освіти на дистанційний та змішаний формати в умовах повномасштабної війни зумовив кризу класичних методів правового виховання та профілактики. Традиційні очні інструменти – такі як уроки, загальношкільні заходи чи друковані стенди – сьогодні виявляються малоефективними, оскільки фізично ізолюють фахівців від реального простору комунікації підлітків.

Оскільки більша частина навчального процесу, соціалізації та дозвілля учнів перенеслася у віртуальну площину, діяльність ФСР/соціальних педагогів має адаптуватися до цих викликів. Адекватним рішенням тут стає використання сучасних цифрових інструментів (інтерактивних платформ, онлайн-курсів, мобільних застосунків та чат-ботів). Очевидно, що вони взмозі забезпечити випереджувальний превентивний вплив саме там, де виникають основні ризики – безпосередньо в соціальних мережах та цифровому середовищі. Крім того, на відміну від епізодичних бесід, такі освітньо-цифрові технології можуть гарантувати безперервний, системний процес формування цифрової компетентності підлітків, їхнього критичного мислення та навичок безпечної

мережевої взаємодії, ефективно навчати учнів розпізнавати маркери маніпуляцій, кібербулінгу й кіберзлочинів уже на найраніших етапах.

Насамкінець, застосування освітньо-цифрових технологій гарантує абсолютну доступність превентивних і корекційних програм для всіх здобувачів освіти незалежно від їхнього поточного географічного перебування (будь то різні регіони України чи статус вимушеного переміщення за кордон) або поточних безпекових умов (сирени, повітряні тривоги, відключення електроенергії), адже вони дозволяють створювати гнучкі освітні траєкторії та здатні забезпечувати рівні можливості для участі учнівської молоді в превентивних проєктах, мінімізуючи наслідки освітніх втрат та соціальної ізоляції, спричинених війною.

Окрім застосування цифрових інструментів дистанційного впливу, не менш вагомого значення в превентивній практиці набуває безпосередня взаємодія та розвиток емоційного інтелекту підлітків, що реалізується через інтерактивно-тренінгові технології.

Практика соціальної роботи свідчить, що підлітки, схильні до проявів онлайн-агресії, девіантної чи ризикованої поведінки, часто демонструють глибокий дефіцит емоційного інтелекту. Вони не здатні розпізнавати власні емоції, контролювати імпульсивні спалахи гніву, а головне – абсолютно не відчувають чужих емоційних кордонів. Відсутність у віртуальному просторі невербальних маркерів (міміки, живої інтонації, сліз чи страху в очах співрозмовника) ще більше блокує емпатію. У зв’язку з цим традиційні інформаційні бесіди чи моралізаторство виявляються неефективними, оскільки не чіпають емоційну сферу особистості, натомість інтерактивно-тренінгові технології спрямовані на глибоке практичне опрацювання цих комунікативних і психологічних дефіцитів.

Важливо розуміти, що використання широкого спектра інтерактивних форм – спеціалізованих тренінгів, практичних воркшопів, методик форум-театру, рольових ігор та симуляцій реальних кіберконфліктів (які завдяки

сучасним інструментам однаково успішно адаптуються як для традиційної очної роботи в класі, так і для дистанційного формату на платформах Zoom чи Google Meet) дозволяє створити унікальний захищений простір. Адже учасники отримують можливість безпечно «прожити» різноманітні сценарії травматичних чи конфліктних ситуацій зсередини. Зокрема, методика рольового моделювання дає змогу агресорові чи свідку кібербулінгу на мить помінятися ролями та відчути на собі весь тягар психологічного тиску, цькування й ізоляції, що руйнує звичні захисні механізми виправдання власної жорстокості.

Разом з тим, застосування інтерактивно-тренінгових технологій забезпечує формування стійкої внутрішньої установки на нульову толерантність до будь-яких проявів цькування та цифрового насильства. Зокрема, завдяки усвідомленню реального психологічного стану, болю та емоцій жертви кібербулінгу в умовах керованої групової рефлексії, підлітки здатні переосмислити наслідки власних необдуманих онлайн-дій (жартів, мемів, поширення компрометуючого контенту). У результаті це може дозволити їм успішно трансформувати деструктивну поведінку у навички асертивної взаємодії, взаємоповаги та конструктивного вирішення суперечок як в офлайн-, так і в онлайн-середовищі.

Водночас, опираючись не лише на групову рефлексію, а й на психологічні особливості учня, важливо враховувати, що у період підліткового віку відбувається якісна переорієнтація соціальних пріоритетів: провідну роль у процесі соціалізації починає відігравати референтна група однолітків, тоді як авторитет батьків і вчителів тимчасово відходить на другий план. Будь-які прямі повчання, заборони чи лекції з боку дорослих зазвичай сприймаються підлітками як тиск, що викликає запеклий опір, захисну реакцію або демонстративне ігнорування. Саме тому логічним *продовженням* роботи стає оперування авторитетом їхнього найближчого соціального кола, що реалізується через технології, які відносяться до групи «рівний – рівному». Такі

технології успішно використовують природний потенціал міжособистісної комунікації, спираючись на спільну мову, цінності, сленг та інтереси молоді, що в результаті забезпечує максимальний рівень довіри до інформації та нових моделей поведінки, які транслюють самі ж підлітки-лідери.

Практична реалізація групи технологій «рівний – рівному» передбачає ретельний відбір, навчання та залучення авторитетних учнів-лідерів, волонтерів і старшокласників до активної профілактичної, просвітницької та підтримуючої діяльності всередині шкільного колективу. Завдяки створеню спеціальних шкільних медіаційний або антибулінгових команд у підлітків можна формувати вміння розпізнавати перші ознаки онлайн-цькування в класах та чатах, реагувати на них і надавати первинну підтримку одноліткам, які опинилися в кризовій ситуації. Оскільки хлопці та дівчата набагато чутливіше реагують на думку колективу, саме залучення лідерів дозволяє ефективно руйнувати закриту субкультуру мовчання, байдужості чи латентного заохочення агресорів.

Найголовнішим здобутком технологій «рівний – рівному» є кардинальна зміна парадигми поведінки найчисельнішої категорії учасників кібербулінгу – свідків. Якщо зазвичай свідки онлайн-цькування займають пасивну позицію або поширюють деструктивний контент заради розваги, то завдяки впливу підлітків-тренерів чи волонтерів вони трансформуються в активних заступників. Коли авторитетний учень відкрито засуджує образливі коментарі в чаті, зупиняє поширення компрометуючої інформації або публічно підтримує потерпілого, це ламає сценарій агресора (кібербулера), позбавляє його публічного схвалення та формує в усьому учнівському середовищі нетерпимість до будь-яких проявів цифрового насильства.

Водночас, окрім використання авторитету однолітків у межах підходу «рівний – рівному», надзвичайно потужним інструментом внутрішньої трансформації учнів-підлітків є творче осмислення реальності та емоційне опрацювання травматичного досвіду, що успішно реалізується через медіаосвітні й арт-технології.

Зрозуміло, що у сучасних реаліях інформаційного перевантаження учні часто виступають пасивними споживачами цифрового контенту, що суттєво підвищує їхню вразливість до маніпуляцій, фейків та деструктивних онлайн-трендів. Саме тому медіаосвітні технології в соціальній роботі спрямовані на якісну зміну цієї пасивної позиції шляхом залучення школярів до створення власного етичного контенту.

Так, самостійна розробка учнівськими мікрогрупами антибулінгових відеороликів, подкастів, анімаційних проєктів, вебкоміксів чи інфографіки для соціальних мереж перетворює підлітків із потенційних агресорів чи байдужих свідків на активних творців безпечних цифрових сенсів. У результаті цього, коли дитина самостійно прописує сценарій про наслідки цькування та презентує його одноліткам, тут таки відбувається глибока когнітивна рефлексія і свідома переоцінка власних вчинків у віртуальному просторі.

Більш того, в умовах хронічного стресу, спричиненого як класичною підлітковою кризою, так і важкими реаліями повномасштабної війни, багато школярів накопичують внутрішню тривожність, приховану агресію чи страхи, які нерідко виплескуються у вигляді девіантної поведінки або ролі жертви в інтернеті. З огляду на це, арт-технології (зокрема фототерапія, кінотерапія, колажування та робота з метафоричними асоціативними картами) надають надійний, екологічний інструментарій невербального самовираження. Водночас вони дозволяють підліткам безпечно «проєктувати» на творчий продукт свої внутрішні травми, комплекси чи психологічний біль без страху бути засудженими, що в результаті значно полегшує процес їх усвідомлення та подальшого психологічного загоєння під кваліфікованим супроводом фахівця.

Зокрема, інтеграція таких медіаосвітніх підходів передбачає також критичний розбір реальних кейсів кібербулінгу, розпізнавання маніпулятивних технологій у соцмережах та детальне вивчення правових наслідків необдуманих публікацій. Саме завдяки цьому в учнів ЗЗСО може формуватися стійкий імунітет проти цифрового насильства, а також випрацьовуватися

звичка відповідально ставитися до свого цифрового відбитку та усвідомлювати, що кожен онлайн-крок має реальні соціальні й етичні наслідки.

Окрім творчого переосмислення та медіаосвіти, для ефективного запобігання цифровому насильству критично важливою є здатність фахівців своєчасно фіксувати приховані загрози до того, як вони переростуть у кризу. Саме тому це реалізується через спеціальні технології раннього виявлення та моніторингу.

Проте, головною проблемою кібербулінгу залишається його прихований (латентний) характер та віртуальна автономність: цькування часто відбувається у закритих месенджер-чатах, ігрових чат-румах чи за допомогою фейкових акаунтів, куди педагоги та батьки зазвичай не мають доступу. Більш того, діти й підлітки надзвичайно рідко звертаються по допомогу самостійно через страх стикнутися з осудом дорослих, ризик втратити гаджети чи побоювання помсти з боку агресорів. У результаті цього технології раннього виявлення здатні ефективно розривати це замкнене коло мовчання, пропонуючи безпечні, цифрові та найчастіше анонімні канали комунікації між здобувачами освіти й соціальним педагогом/ФСР.

Так, на практиці група технологій раннього виявлення охоплює регулярні анонімні онлайн-опитування та психологічні скринінги клімату в класних колективах, цифрові скриньки довіри на базі чат-ботів у Telegram чи Viber, а також спеціалізовані платформи зворотного зв’язку. Завдяки такій анонімності учні отримують можливість безпечно повідомити про факти цькування (якщо вони стали жертвою чи свідком) без жодного ризику бути викритими перед однолітками. З огляду на зазначене, для фахівців із соціальної роботи це слугує потужним інструментом постійного цифрового моніторингу, що в результаті дозволяє виявляти первинні маркери ескалації напруги, зміни соціометричної структури класу чи появу груп ризику вже на найраніших етапах.

Слід зазначити, що збільшого, своєчасне фіксування деструктивних тенденцій за допомогою моніторингових технологій дає змогу

ФСР/соціальному педагогу та психологічній службі школи не реагувати постфактум на глибокі психотравми чи суїцидальні ризики, а здійснювати своєчасне втручання превентивного та коригувального характеру. У результаті цього забезпечується швидке згортання конфліктних ситуацій, успішно попереджається перехід кібербулінгу у хронічні форми та мінімізуються негативні наслідки для психічного здоров'я всіх учасників освітнього процесу в умовах дистанційного та змішаного навчання.

Водночас, окрім своєчасного виявлення та моніторингу загроз, у випадках, коли інциденти цифрового насильства вже відбулися, фундаментального значення набуває свідома відмова від каральних методів на користь відновлення порушених стосунків та психологічної безпеки, що успішно реалізується через технології відновного та травмоінформованого підходу.

Маємо акцентувати увагу на тому, що у сучасній педагогічній та соціально-педагогічній практиці тривалий час домінував адміністративно-каральний підхід. Виявлення агресора зазвичай тягло за собою суворі дисциплінарні стягнення, офіційні попередження, постановку на внутрішньошкільний облік або погрози залученням поліції. Проте досвід соціальної роботи переконливо доводить, що залякування, сором і покарання аж ніяк не усувають першопричин агресивної поведінки. Навпаки, вони викликають у учня-підлітка запеклий захисний опір, гостре почуття несправедливості та латентну озлобленість, яка часто виливається у нові, ще більш приховані й витончені форми кібербулінгу в анонімних чатах.

З огляду на викладене вище, сучасний травмоінформований підхід виходить із глибокого розуміння того, що більшість агресорів у кіберпросторі самі є травмованими особами, які за допомогою булінгу намагаються компенсувати власну безпорадність, тривожність або наслідки хронічного стресу, що є особливо актуальним в умовах воєнного стану.

Цікаво, що застосування технологій відновного правосуддя передбачає використання таких дієвих інструментів, як шкільна медіація, відновлювальні конференції та кола відновлення. Зокрема, замість того щоб шукати винного виключно задля покарання, фахівець із соціальної роботи/соціальний педагог має залучати до конструктивного діалогу всіх учасників ситуації (постраждалого, агресора та активних свідків). Завдяки фасилітації нейтрального медіатора сторони отримують безпечний простір для відвертого висловлення власних емоцій і поглядів. У результаті цього агресор має змогу усвідомити реальні наслідки своїх дій для психічного стану жертви без страху бути публічно засудженим, а натомість постраждалий отримує можливість відновити почуття справедливості та безпеки.

Здебільшого, упровадження травмоінформованого підходу гарантує, що жоден із учасників конфлікту не зазнає вторинної віктимізації внаслідок некомпетентного втручання дорослих. Так, робота спрямована не на ізоляцію «важкого» учня-підлітка, а на його ресоціалізацію, усвідомлення особистої відповідальності за цифровий відбиток та активне залучення до спільної діяльності задля відшкодування завданої моральної шкоди (наприклад, через спільні соціальні чи творчі проєкти). Саме завдяки цьому вдається повністю відновити зруйновані соціальні зв’язки всередині класного колективу, знизити загальний рівень психологічної напруги та сформувати безпечне, емпатичне середовище, здатне ефективно протистояти будь-яким проявам цифрового насильства.

Між тим, окрім загальної характеристичної структури груп технологій, перейдемо до розгляду їх практичного втілення в безпосередній діяльності фахівця з соціальної роботи чи соціального педагога в ЗЗСО.

Передусім, починаючи предметний огляд прикладних інструментів, детально зупинимося на першій розробці в межах освітньо-цифрового спрямування – авторській Програмі «Цифровий навігатор безпеки» (Програма).

Так, зазначену вище інноваційну Програму можна вважати гнучким, адаптивним та практико-орієнтованим інструментом превентивної діяльності, який спрямований на системне формування цифрової грамотності й кібербезпеки здобувачів освіти.

Програма «Цифровий навігатор безпеки» побудована за принципом коротких, динамічних освітніх блоків тривалістю по 10–15 хвилин, що оптимально відповідає психологічним особливостям сучасного кліпового мислення учнів-підлітків та легко інтегрується в дистанційний або змішаний освітній процес (наприклад, на початку онлайн-уроків чи позакласних виховних годин). З огляду на це, її змістове наповнення охоплює найважливіші теми цифрової гігієни:

- правила налаштування високого рівня конфіденційності в соціальних мережах;
- чіткі алгоритми виявлення та критичного аналізу фейків і новітніх загроз на кшталт діпфейків;
- правила свідомого захисту персональних даних;
- запобігання несанкціонованому доступу сторонніх осіб до приватного контенту.

Програма передбачає активне використання спеціально налаштованого шкільного чат-бота або захищеного Telegram-каналу, який виконує роль цифрового супутника безпеки. У цьому просторі учні мають можливість у режимі 24/7 та повністю анонімно отримати чіткий покроковий алгоритм дій у разі зіткнення з кібербулінгом, погрозами чи шантажем у мережі, а також оперативно звернутися по допомогу до ФСР/соціального педагога без страху перед публічним розголосом.

Важливим елементом Програми є партисипативний підхід – залучення самих учнів до спільного створення та обговорення «Цифрового кодексу класу» (або етичних правил онлайн-взаємодії). Замість готових заборон зверху, дівчата та хлопці можуть спільно формулювати норми онлайн-поведінки, взаємної

поваги та відповідальності за цифрові вчинки, що забезпечує високий рівень внутрішньої мотивації дотримуватися цих правил та реагувати на їх порушення.

Важливо зазначити, що завдяки повному перенесенню інструментарію у віртуальне середовище, Програму «Цифровий навігатор безпеки» можна вважати максимально ефективною в умовах воєнного стану, дистанційної освіти чи періодів безпекових обмежень, оскільки вона не вимагає обов'язкової фізичної присутності учнів у закладі освіти, забезпечуючи рівний доступ до превентивних ресурсів для всіх учасників навчально-виховного процесу.

Паралельно з застосуванням Програми «Цифровий навігатор безпеки», фахівець із соціальної роботи/соціальний педагог може активно використовувати практики безпосереднього залучення лідерів учнівського середовища (технологія «рівний – рівному»).

Концепція даної технології полягає в тому, що фахівець ініціює створення добровільного об'єднання учнів-старшокласників чи лідерів думки, які користуються високим авторитетом серед однолітків.

Важливо розуміти, що добір учасників має базуватися на принципах високого рівня емпатії, розвинених комунікативних навичок та лідерського потенціалу, що дозволяє сформувати дієве ядро підтримки всередині закладу освіти. Більш того, майбутні «амбасадори безпеки» мають пройти спеціалізований курс підготовки під керівництвом фахівця. Зміст такого курсу повинен охоплювати поглиблене вивчення специфіки кібербулінгу, розвиток навичок емпатійного слухання, розпізнавання прихованих маркерів психологічних травм, хронічного стресу чи проявів посттравматичного стресового розладу у однолітків, а також оволодіння чіткими етичними алгоритмами безпечного реагування та перенаправлення постраждалих до профільних фахівців.

У результаті цього підготовлені волонтери можуть реалізовувати профілактичну роботу безпосередньо у своєму середовищі: проводити

інтерактивні мінізаняття, пізнавальні воркшопи чи просвітницькі кампанії для молодших або паралельних класів, створювати атмосферу безпеки та взаємоповаги в шкільних чатах. Між тим вони можуть надавати первинну неформальну підтримку жертвам цифрового цькування, допомагаючи їм подолати почуття самотності, сорому чи страху перед зверненням по дорослу допомогу, і тим самим успішно руйнувати культуру мовчання та байдужості.

Слід зазначити, що в умовах повномасштабної війни, коли навантаження на соціальних педагогів є надзвичайно високим, а фізичний доступ до спеціалізованих центрів чи очної допомоги ускладнений безпековою ситуацією, технологія «рівний-рівному» стає життєво необхідним буфером. Вона дозволяє розширити мережу психосоціальної підтримки, забезпечити безперервний моніторинг клімату в колективі та надати оперативну первинну допомогу тим здобувачам освіти, які найбільше потребують емоційної стабілізації та захисту від цифрового насильства.

Поряд із залученням учнівських команд підтримки за принципом «рівний – рівному», вагомим інструментом практичної діяльності ФСР/соціального педагога в межах соціальної профілактики виступає інтерактивне проживання школярами кризових ситуацій через творчу ігрову діяльність. Зокрема, значну роль тут відіграє технологія «Форум-театру та симуляційних кейсів», мета якої полягає в розвитку емоційного інтелекту учнівської молоді, формуванні навичок конструктивного розв’язання конфліктів та подоланні пасивної позиції свідків цифрового насильства.

Змістовне наповнення зазначеної технології може бути пов’язане з тим, що учасники освітнього процесу під керівництвом фахівця готують та розігрують невеликі сценки (етюди або симуляційні кейси), що відтворюють реальні життєві ситуації цькування в мережі: створення образливих мемів, поширення компрометуючого контенту, цькування у шкільних чатах або виключення з віртуальних спільнот. У результаті цього в процесі розігрування

кожен учасник може спробувати себе в ролі жертви, агресора чи байдужого свідка, що дає змогу зсередини відчути психологічні наслідки кожної ролі.

Ключовою особливістю «Форум-театру» є те, що після початкового розігрування сценки в найгостріший момент лунає команда «Стоп!». Після цього глядачі можуть зупинити дію, вийти на сцену замість актора та запропонувати власні екологічні варіанти розв'язання конфлікту. У результаті пасивні спостерігачі перетворюються на активних учасників, які на практиці вчаться захищати особисті кордони, протистояти маніпуляціям та надавати дієву допомогу жертві.

На нашу думку, зазначена технологія забезпечує глибоке емоційне проживання ситуації, завдяки чому підлітки розвивають здатність до емпатії та усвідомлюють руйнівний вплив цифрової агресії. Учасники вчаться брати особисту відповідальність за власний цифровий відбиток і реакцію на кібербулінг, розуміючи, що позиція «я нічого не роблю, бо це не стосується мене» фактично заохочує агресора. Важливим є і той факт, що у сучасних умовах повномасштабної війни та дистанційної освіти технологія «Форум-театру та симуляційних кейсів» успішно модифікується під онлайн-середовище. Для цього можна використовувати сесійні зали (кімнати) на платформах Zoom чи Google Meet, де мікрогрупи учнів спільно обговорюють та редагують сценарії, а також проводять мініспектаклі в онлайн-форматі із застосуванням інструментів спільного редагування тексту та віртуальних дошок.

Поряд із рольовим моделюванням та симуляційними іграми, для поглибленої діагностики й постійного контролю психологічного стану школярів у кіберпросторі фахівець із соціальної роботи/соціальний педагог має задіювати інструменти саморефлексії та моніторингу. Зокрема, в цьому контексті варто детальніше проаналізувати технологію «Цифровий щоденник емоцій та безпеки», яка покликана розвивати в учнів навички самопізнання, оперативно виявляти приховані онлайн-загрози та відстежувати психоемоційний стан здобувачів освіти під час воєнного стану.

Ми пропонуємо власний погляд на її зміст, який складається з:

По-перше, анонімної фіксації емоційного стану та випадків некомфортної комунікації, коли за допомогою спеціалізованих цифрових інструментів (онлайн-форм, мобільних додатків чи інтерактивних щоденників у чат-ботах) учні регулярно та повністю анонімно фіксують свій загальний психоемоційний стан після перебування в мережі інтернет і соціальних мережах. Окрім емоційного фону (наприклад, рівня втоми, тривожності чи роздратування), підлітки мають змогу безпечно зафіксувати випадки некомфортної комунікації, токсичних коментарів, цькування або виключення з віртуальних спільнот, не побоюючись публічного розголосу чи осуду з боку однолітків.

По-друге, аналізу загальних тенденцій і корекції превентивної програми, коли ФСР/соціальний педагог узагальнюють отримані дані у вигляді зведених аналітичних зрізів без розкриття особистих даних. Зазначене дозволяє виявити піки напруги в конкретних класах або групах, а також специфічні тригери, які найчастіше викликають стрес у медіапросторі. На основі виявлених тенденцій фахівець може оперативно коригувати зміст превентивної програми, вводячи додаткові модулі або фокусуючись на актуальних проблемах (захисті від маніпуляцій чи кібербулінгу в певних ігрових чатах, тощо).

По-третє, своєчасного виявлення учнів з ознаками підвищеної тривожності чи ПТСР. Адже завдяки регулярному моніторингу емоційних маркерів технологія дає змогу на ранніх етапах ідентифікувати здобувачів освіти, які демонструють стійкі ознаки підвищеної тривожності, емоційного вигорання або симптоми ПТСР, зумовленого наслідками війни та хронічним стресом. Це забезпечує можливість адресного та своєчасного надання професійної психологічної допомоги деструктивним або постраждалим учням до того, як психологічні проблеми переростуть у глибокі кризові стани.

Разом із щоденним моніторингом емоційного стану та профілактичною саморефлексією, у тих випадках, коли факти цифрового насильства вже спричинили кризу в колективі, ФСР/соціальний педагог може застосувати технології відновного

правосуддя. Далі розглянемо фінальну прикладну розробку в цій системі – технологію «Відновних кіл» з елементами травмоінформованого підходу. Очевидь її варто вважати гуманістичним та ефективним інструментом реагування на інциденти кібербулінгу, який спрямований на подолання наслідків конфлікту, усвідомлення відповідальності та відновлення безпечного мікроклімату в колективі без застосування деструктивних каральних заходів.

У випадках, коли кібербулінг уже віідбувася (поширено знущальні фото, цькування у груповому чаті чи бойкот, тощо), ФСР/соціальний педагог як фасилітатор може організувати структуровану зустріч – «Відновне коло». До участі в процесі залучити безпосередньо постраждалого (жертву), ініціатора цькування (агресора), активних свідків (які спостерігали або підтримували агресію лайками) та профільних фахівців чи батьків (за необхідністю). Кожен учасник отримує безпечну можливість висловити свій погляд на ситуацію та розповісти про пережиті почуття.

Важливо підкреслити, що метою зазначеної технології є не залякування, офіційні стягнення чи покарання учня-агресора (які зазвичай лише посилюють озлобленість та провокують нові, ще більш приховані хвилі булінгу), а глибоке усвідомлення ним реальної шкоди, завданої психологічному стану іншої людини. Завдяки конструктивному діалогу підліток-агресор приймає особисту відповідальність за свої вчинки в мережі та долучається до спільного вироблення плану відновлення справедливості (публічне спростування неправдивої інформації в чаті, вибачення чи спільна участь у проєкті з кібербезпеки).

Впровадження травмоінформованого підходу є дуже важливим в умовах повномасштабної війни, коли рівень загальної психологічної напруги, тривожності та вразливості здобувачів освіти й без того є надзвичайно високим. Технологія гарантує, що ані жертва, ані агресор не зазнають вторинної віктимізації чи публічного приниження з боку педагогічного колективу, що дозволяє екологічно знизити градус напруги, відновити порушені соціальні зв’язки та забезпечити стабільну психологічну безпеку освітнього середовища.

Поряд із використанням інструментів точкового реагування на критичні ситуації, задля досягнення стійкого та довготривалого ефекту весь масив обговорених вище технологій вимагає чіткої поетапної організації.

У таблиці 6 відображено послідовний алгоритм впровадження інноваційних інструментів ФСР/соціальним педагогом в ЗЗСО. Водночас для успішної реалізації такого підходу необхідні підтримка з боку адміністрації, готовність педагогів освоювати нові формати, наявність необхідних технічних умов, суворе дотримання конфіденційності, регулярне підвищення кваліфікації працівників у галузі кібербезпеки та травмоінформованого підходу, а також тісне партнерство з громадськими організаціями, психологічними службами та підрозділами кіберполіції.

Таблиця 6

Алгоритм впровадження інноваційних технологій соціальної профілактики та протидії кібербулінгу

	Етап впровадження	Зміст та практичні заходи реалізації етапу
	Діагностика	Оцінювання поширеності кібербулінгу, цифрової культури та психоемоційного клімату в колективі. Проводиться за допомогою анонімних опитувань і моніторингу стану учнів з урахуванням ризиків хронічного стресу та ПТСР.
	Формування міжфахової команди	Об'єднання зусиль ФСР/соціального педагога, психолога, адміністрації, ІТ-спеціаліста та учнівського самоврядування для координації дій і розподілу відповідальності.
	Вибір і адаптація технологій	Вибір оптимального комплексу інноваційних технологій з урахуванням формату навчання (очний, змішаний, дистанційний), віку учнів та ресурсів школи.
	Підготовка педагогів і батьків	Проведення просвітницьких заходів для вчителів і батьків із акцентом на цифрову грамотність, розпізнавання онлайн-агресії та комунікацію з дітьми, які мають травматичний досвід.
	Пілотне впровадження	Запуск обраних технологій у тестовому режимі на базі пілотних класів задля перевірки їхньої ефективності та виявлення можливих труднощів.
	Моніторинг ефективності та корекція	Відстеження результатів за допомогою цифрових щоденників емоцій, чат-ботів і спостережень медіаторів для оперативного коригування програм у разі появи нових ризиків.
	Масштабування	Поширення успішно випробуваних технологій на весь заклад освіти, інтеграція напрацювань до річного плану роботи школи та створення сталої системи запобігання цифровому насильству.

Таким чином, інноваційні технології соціальної роботи відкривають якісно нові можливості для попередження та подолання кібербулінгу в закладах загальної середньої освіти України в умовах воєнного стану. Вони дозволяють перейти від пасивного інформування до активного формування цифрової культури, розвитку навичок безпечної поведінки та створення підтримуючого середовища навіть за дистанційного чи змішаного навчання.

Висновок. Результати проведеного дослідження засвідчують, що кібербулінг серед учнів закладів загальної середньої освіти України являє собою багатовимірне й динамічне явище, яке особливо загострилося в умовах воєнного стану, активного використання дистанційних і змішаних форм навчання, а також підвищеного психоемоційного навантаження на підлітків. Дані статистики підтверджують серйозність проблеми: більше половини школярів зазнають онлайн-цькування, а близько третини самі долучаються до таких дій. Це зумовлює необхідність відмови від традиційних підходів до профілактики на користь системного впровадження інноваційних технологій соціальної роботи.

Вивчення сучасного стану проблеми дозволило встановити, що кібербулінг проявляється в різноманітних формах (харасмент, кібер-переслідування, розголошення приватної інформації, тролінг, флеймінг, соціальна ізоляція тощо), передбачає чітко окреслені ролі учасників і зумовлюється комплексом чинників – індивідуально-психологічних, сімейних, шкільних і технологічних. Негативні наслідки онлайн-агресії охоплюють соціальну, психологічну, педагогічну та фізіологічну сфери і часто посилюються наявністю у здобувачів освіти симптомів посттравматичного стресового розладу.

У системі протидії цифровому насильству провідну роль відіграють фахівці з соціальної роботи та соціальні педагоги. Саме вони забезпечує цілісний підхід, що включає первинну, вторинну та третинну профілактику, координують взаємодію між учнями, батьками, педагогами та зовнішніми структурами, а також сприяють формуванню в учнівському середовищі культури активної небайдужості серед свідків цькування.

Головним науковим результатом роботи стала систематизація та обґрунтування інноваційних технологій соціальної роботи, адаптованих до українських умов воєнного часу. Найбільш перспективними серед них визначено технологію «Цифровий навігатор безпеки», «Рівний – рівному», «Форум-театр із симуляційними кейсами», «Цифровий щоденник емоцій та безпеки», а також «Відновні кола» з елементами травмоінформованого підходу. Зазначені інструменти ефективно функціонують як в очному, так і в дистанційному форматах, ураховують травматичний досвід учнів і сприяють розвитку цифрової культури, емпатії та відповідальної онлайн-поведінки.

Практична цінність дослідження полягає в можливості безпосереднього застосування запропонованих технологій фахівцями із соціальної роботи та соціальними педагогами в закладах загальної середньої освіти. Їх упровадження сприятиме створенню безпечного освітнього середовища, зниженню рівня кібербулінгу та зміцненню психологічної стійкості учнів в умовах тривалої соціальної кризи.

Подальші наукові розвідки доцільно спрямувати на емпіричну перевірку ефективності розроблених технологій, оцінку їх довгострокового впливу, а також адаптацію інструментарію до потреб різних вікових категорій і груп учнів (внутрішньо переміщені особи, діти з особливими освітніми потребами, здобувачі з вираженими проявами ПТСР).

Отже, інноваційні технології соціальної роботи виступають не лише засобом протидії цифровому насильству, а й важливим ресурсом формування безпечного, підтримуючого та стійкого освітнього простору в сучасній Україні.

References:

Бурлака А. А., Вольнова Л. М. Булінг як форма прояву агресивності підлітків. *Психологічні та правові стратегії запобігання й подолання булінгу*. 2025. С. 10. URL: https://surl.li/azqrta (дата звернення: 18.06.2026).

Грубі Т. В., Купчишина В. Ч. Кібербулінг як сучасна практика в системі соціальної комунікації. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Психологія*. 2024. Том 35 (74), № 3. С. 41–46. DOI: https://doi.org/10.32782/2709-3093/2024.3/06

Гудима О. В., Ковтун А. І. Психосоціальні детермінанти агресивної поведінки підлітків. 2026. С. 55-65. URL: https://surl.li/xoloho (дата звернення: 10.06.2026)

Гура А., Содолевська В. Вплив булінгу на психічне здоров'я дітей та підлітків: механізми виникнення та наслідки. *Psychosomatic Medicine and General Practice*. 2024. Vol. 9, no. 4. URL: https://surl.li/rmtvnc (дата звернення: 10.06.2026).

Давидюк М. О., Музика С. Д. Булінг в освітньому середовищі університету: причини і наслідки. *Педагогічна Академія: наукові записки*. 2025. Вип. 25. URL: https://surl.lu/veqpss (дата звернення: 18.05.2026).

Лалюк Г. М. Насильство в кіберпросторі: соціально-психологічний аспект. *Інформаційні технології в освіті та практиці : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції* (Львів, 17 грудня 2021) / упорядник: Т. В. Магеровська. Львів : ЛьвДУВС, 2021. С. 53–56. URL: https://surl.li/bizrsb (дата звернення: 12.06.2026).

Лещенко О. Г., Тимчишин І. В. Соціально-педагогічна профілактика кіберсуїциду серед підлітків. *The 9th International scientific and practical conference «Innovative development of science, technology and education»* (June 6-8, 2024). Perfect Publishing, Vancouver, Canada, 2024. С. 307–316. URL: https://surl.li/dcyfrx (дата звернення: 10.06.2026)

Момот О. В. Кібербулінг: причини та передумови агресії у віртуальному світі. *Злочинність у глобалізованому світі : матеріали XVI Всеукраїнської кримінологічної конференції для студентів, аспірантів та молодих вчених* (м. Харків, 12 груд. 2017 р.). Харків, 2017. С. 253–256.URL: https://surli.cc/wxxajw (дата звернення: 24.05.2026)

Національна поліція України; Опендатабот (2026). Статистика випадків булінгу в закладах освіти за ст. 173-4 КУпАП у 2025 році. URL: https://surl.li/rjmgrg (дата звернення: 10.05.2026).

Плетенчук Р. С., Пакушина Л. З. Особливості дітей-кібербуллерів. *Актуальні проблеми природничих і гуманітарних наук у дослідженнях молодих учених «Родзинка – 2019» : XXI Всеукраїнська наукова конференція молодих учених*. Черкаси : ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2019. С. 386–388. URL: https://eprints.cdu.edu.ua/id/eprint/3641(дата звернення: 30.05.2026).

Про затвердження Державного стандарту соціальної послуги профілактики : Наказ Міністерства соціальної політики України від 10.09.2015 № 912. URL: https://surl.li/ylmnpi (дата звернення: 04.04.2026).

Про соціальні послуги : Закон України від 17.01.2019 № 2671-VIII : станом на 7 лют. 2026 р. URL: https://surl.li/avlvkr (дата звернення: 04.04.2026).

Sense Research, Dignity Online (2026). Національне дослідження онлайн-безпеки дітей в Україні. URL: https://surl.li/ftsxug (дата звернення: 06.05.2026).

Сотніченко Н. О., Данилевич Л. А. Соціально-психологічні особливості кібербулінгу в шкільному середовищі. *Наукові перспективи*. 2024. № 12(54). С. 1711–1723. DOI: https://doi.org/10.52058/2708-7530-2024-12(54)-1711-1723

Щербан Т. Д., Греба І. З., Бергхауер-Олас Е. Л. Психологічні механізми шкільного насильства та булінгу: аналіз із позицій загальної психології. *Педагогічна Академія: наукові записки*. 2026. Вип. 26. URL: https://surl.li/jwrdci (дата звернення: 18.05.2026).

ЮНІСЕФ. 67 % українських підлітків стикались з проблемою булінгу. *Ukraine crisis media center*. URL: https://surl.li/isvaoi (дата звернення: 11.04.2026).

Olweus D. Bullying in schools: Facts and intervention. *Kriminalistik*. 2010. Vol. 64, no. 6. P. 1–29. URL: https://surli.cc/lnpgaq (дата звернення: 27.05.2026).

Wolak J., Mitchell K., Finkelhor D. Does Online Harassment Constitute Bullying? An Exploration of Online Harassment by Known Peers and Online-Only Contacts. *Journal of Adolescent Health*. 2007. Vol. 41, iss. 6, supl. 1. P. S51–S58. URL: https://surl.li/crgmrt (дата звернення: 01.06.2026).

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-327
UDC 377:004.9:378.147

CHAPTER 10.
STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF EMPIRICAL RESULTS IN THE DEVELOPMENT OF DIGITAL SKILLS OF FUTURE VOCATIONAL EDUCATION TEACHERS

Yevhen KUZNIETSOV
PhD-Student
Hryhorii Skovoroda University in Pereiaslav
30 Sukhomlynsky Street, Pereiaslav, 08401, Ukraine
kevgen392@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-3994-9092

Abstract. The chapter presents a structural-functional interpretation of the empirical results obtained in the study of digital skills development among future vocational education teachers. The research is based on the premise that the achieved level of digital skills cannot be adequately explained by isolated quantitative indicators. The empirical results are therefore interpreted through the relationships between structural components, diagnostic criteria, empirical indicators, and their professional-pedagogical functions. The study analyzes the baseline configuration of digital skills identified at the ascertaining stage and the subsequent changes produced by the formative pedagogical intervention. Particular attention is paid to the differentiation between quantitative growth, structural reconfiguration, and functional transformation of digital skills. The findings demonstrate that the effectiveness of pedagogical influence is reflected not only in the increase of individual indicators but also in the harmonization of the internal structure of digital skills and the expansion of students' capacity for professionally meaningful digital action. The integrated interpretation confirms the interdependence between the cognitive-informational, operational-technological, structural-integrative, and motivational-reflexive dimensions of digital skills development. The results substantiate the analytical value of the proposed structural-functional approach for evaluating systemic changes in the professional preparation of future vocational education teachers.

Keywords: empirical interpretation; pedagogical experiment; structural dynamics; functional transformation; professional readiness; digital environment; formative intervention.

Introduction. The digital transformation of education has substantially changed the requirements for the professional preparation of future vocational education teachers. Digital technologies are increasingly integrated into educational design, information management, communication, assessment, and the organization of

learning activities. Under these conditions, the development of digital skills becomes an important component of professional preparation within specialty A5 *Professional education (by specialization)*.

However, the development of digital skills cannot be adequately interpreted through the ability to use individual software applications or perform isolated technological operations. Professional digital activity requires the combination of knowledge, practical actions, information processing, pedagogical decision-making, and reflective evaluation. Therefore, the assessment of digital skills should take into account not only their quantitative level but also their internal structure and functional manifestation.

This issue becomes particularly important in the preparation of future vocational education teachers, whose professional activity requires the integration of digital tools with specific educational and methodological objectives. A technically competent user may successfully perform individual operations without being able to select appropriate digital resources, organize a digital learning environment, or adapt technological solutions to particular pedagogical tasks.

The empirical study underlying this chapter was therefore based on a multidimensional understanding of digital skills development. The obtained empirical material was considered as a system of interconnected characteristics rather than as a collection of independent numerical indicators. Such an approach made it possible to examine the relationships between individual components and to determine their contribution to the overall development of professional digital readiness.

The analytical problem addressed in the chapter concerns the interpretation of empirical changes obtained during the pedagogical experiment. A numerical increase in an indicator does not automatically demonstrate systemic development. The scientific meaning of such an increase depends on the structural position of the indicator, its relationship with other components, and the professional functions that become possible as a result of its development.

For this reason, the study distinguishes between quantitative growth, structural reconfiguration, and functional transformation. Quantitative growth refers to changes in the numerical values of particular indicators. Structural reconfiguration concerns changes in the internal relationship and balance between the components of digital skills. Functional transformation reflects changes in what future vocational education teachers are able to accomplish through the developed digital skills.

The analytical framework of the study is based on the architectonic model of digital skills development substantiated in the preceding research. Within this model, digital skills are represented as an interconnected system rather than as a set of independent abilities. The model provides a basis for correlating empirical indicators with specific structural components and for interpreting their development in relation to professional activity.

The architectonic approach is important because the same empirical value may have different meanings depending on its structural context. A relatively high result in one area may indicate an established component of digital readiness, while a similar result in another area may have limited systemic significance if other components remain insufficiently developed.

Accordingly, the interpretation of empirical results requires movement from isolated indicators toward their structural configuration. This analytical transition makes it possible to identify dominant, supporting, and problematic areas of development and to establish whether the initial profile of digital skills is balanced or characterized by internal asymmetries.

The ascertaining stage of the pedagogical experiment provided the empirical basis for such an analysis. Its purpose was to establish the initial configuration of digital skills before the formative pedagogical influence. The baseline was considered not only as a numerical reference point for subsequent comparison but also as a structural profile revealing areas of relative strength and insufficient development.

The analysis of the baseline configuration was conducted at several interconnected levels. At the generalized level, the distribution of participants

according to the identified levels of digital skills development was considered. At the component level, the internal structure of the digital skills system was examined. At the indicator level, specific empirical manifestations contributing to the development of individual components were analyzed.

Such a hierarchy was necessary because a generalized level may conceal substantial differences in the internal structure of digital skills. Participants with similar overall results may possess different combinations of strengths and limitations. Consequently, the identification of the initial structural profile provides a more informative basis for determining subsequent developmental trajectories.

The formative stage was interpreted as a purposeful pedagogical intervention aimed at transforming the identified initial configuration. Its effectiveness was therefore evaluated not simply through the comparison of mean values before and after the intervention, but through the analysis of changes occurring within the structural components and their functional manifestations.

Particular attention was given to the differences in developmental dynamics between components. The empirical framework assumed that technological and informational abilities may demonstrate a different developmental trajectory from abilities associated with pedagogical integration, reflection, and professional decision-making. Such differences are important for understanding the internal dynamics of digital skills development.

The comparative dimension of the pedagogical experiment also required consideration of the relationship between the experimental and control groups. The control group provided a reference for distinguishing changes associated with ordinary educational processes from changes associated with the purposeful formative conditions introduced during the experiment.

A further analytical challenge concerned the transition from structural development to professional functionality. Digital skills acquire professional significance when they enable future vocational education teachers to perform meaningful pedagogical actions. These actions include information management,

digital content curation, integration of technologies into educational scenarios, organization of interaction in digital environments, and solution of pedagogical problems.

The functional interpretation therefore complements the structural analysis. While structural analysis answers the question of how the components of digital skills are organized and how they change, functional analysis addresses what these changes enable future teachers to do in professional and educational contexts.

This distinction is particularly relevant because technological proficiency alone does not guarantee professional readiness. The ability to operate a digital tool becomes professionally meaningful when it is connected with curriculum objectives, learning outcomes, student needs, and appropriate pedagogical strategies. Thus, functional transformation represents a qualitative dimension of digital skills development.

The integrated structural-functional approach consequently establishes a relationship between empirical indicators and professional-pedagogical outcomes. It allows the results of the pedagogical experiment to be interpreted as evidence of changes in the organization and functionality of digital skills rather than merely as evidence of increased test scores.

The analytical framework also provides a basis for determining the sustainability of the observed changes. The formative results may demonstrate developmental progress, but certain complex characteristics require additional verification under conditions of independent professional activity. In this respect, the control stage is understood as an important component of empirical validation rather than as a formal final measurement.

The relevance of such verification is associated particularly with the stability of structural balance, functional autonomy, and reflective capacity. These characteristics cannot be fully established through short-term measurements alone because their professional manifestation involves the ability to transfer digital skills to new and less controlled educational situations.

Against this background, the purpose of this chapter is to provide a structural-functional interpretation of the empirical results obtained in the study of digital skills development among future vocational education teachers. The analysis focuses on the relationship between the initial structural profile, the dynamics produced by the formative intervention, and the resulting transformation of professional-pedagogical functionality.

The chapter consequently seeks to demonstrate that the interpretation of empirical results should extend beyond the identification of positive or negative quantitative changes. The central analytical task is to establish how individual changes are organized within the broader system of digital skills and how this structural development is reflected in the professional capabilities of future vocational education teachers.

1. Structural analysis of the empirical development of digital skills.

The empirical study of digital skills development among future vocational education teachers was conducted in nine higher education institutions of Ukraine that provide master's training in specialty A5 *Professional Education (by specialization)*. The participation of several higher education institutions made it possible to examine the phenomenon under conditions that were not limited to the educational environment of a single institution. The empirical material obtained from the participating institutions was therefore considered as a broader basis for identifying common structural tendencies in the development of digital skills among future vocational education teachers.

The structural analysis was based on the assumption that digital skills constitute a multidimensional educational phenomenon. Their development cannot be adequately represented by a single generalized score because individual skills differ in content, functional purpose, developmental dynamics, and professional significance. Consequently, the empirical results were interpreted through the internal organization of digital skills and through the relationships established between their structural components, criteria, indicators, and levels of manifestation.

The methodological premise of the analysis was that a quantitative indicator becomes scientifically meaningful only when its position within the overall structure of digital skills has been established. A higher value of an individual indicator may demonstrate a specific developmental advantage, but it does not necessarily mean that the entire system has reached a corresponding level of development. Conversely, a comparatively lower result may indicate not simply an individual deficit but a structural limitation that affects the development or functional realization of other components. This principle determined the analytical orientation of the study from the initial diagnostic assessment to the interpretation of the formative results.

The structural analysis therefore proceeded from the architectonic model of digital skills development substantiated in the preceding research. The model was used as a common analytical framework for organizing the empirical evidence and maintaining methodological continuity between the conceptual and experimental parts of the study. It made it possible to associate individual empirical indicators with corresponding structural components and subsequently determine how changes in these components affected the overall configuration of digital skills. The model consequently performed not only a classificatory function but also a diagnostic and interpretive function.

The analytical logic was organized according to the following sequence: **structural component → criterion → empirical indicator → level of manifestation → functional interpretation**. This sequence ensured that the empirical results were interpreted from the particular to the general without losing the relationship between individual indicators and the system to which they belonged. At the same time, the model made it possible to examine both horizontal relationships between components and vertical relationships between indicators, criteria, and generalized levels of development.

ANALYTICAL FRAMEWORK FOR THE SYSTEMIC DEVELOPMENT OF DIGITAL READINESS IN SPECIALTY A5 (Professional education (by specialization))

1. STRUCTURAL COMPONENT	2. ASCERTAINING BASELINE	3. MATHEMATICAL FORMULA & CALCULATION METHODOLOGY	4. RESULTING FUNCTIONAL TRANSFORMATION
1. COGNITIVE–INFORMATIONAL COMPONENT (Knowledge & Information Literacy)	• Baseline knowledge level (M_{pre}) • Information search efficiency • Theoretical competency index • Diagnostic assessment results	**Descriptive statistics:** M_{pre}, SD_{pre}, SE_{pre} **Relative level:** $R_{cog} = \frac{M_{pre}}{M_{max}} \times 100\%$	• Enhanced information literacy • Improved analytical thinking • Systematized knowledge structure • Increased cognitive autonomy
2. OPERATIONAL–TECHNOLOGICAL COMPONENT (Digital Tools & Operational Proficiency)	• Baseline practical skills level • Software/tool usage frequency • Task execution accuracy • Efficiency and error metrics	**Performance metrics:** P_{pre}, E_{pre}, T_{pre} **Efficiency index:** $E_{op} = \frac{P_{pre}}{T_{pre}} \times 100\%$	• Improved digital tool proficiency • Higher task execution accuracy • Optimized operational efficiency • Reduced error rate
3. STRUCTURAL–INTEGRATIVE COMPONENT (Systemic Integration & Readiness Coefficient)	• Component weight distribution (w_i) • Structural balance analysis • Integration level assessment • Readiness coefficient baseline	**Structural coefficient of digital readiness:** $K_{struct} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{w_i}{w_{max}}$ **Quantitative growth index:** $I_{dev} = \frac{M_{post} - M_{pre}}{M_{pre}} \times 100\%$	• Balanced structural development • Enhanced system integration • Increased digital readiness • Sustainable competency growth
4. MOTIVATIONAL–REFLEXIVE COMPONENT (Motivation, Reflection & Professional Readiness)	• Motivation level (survey-based) • Reflective activity intensity • Professional readiness scale • Longitudinal tracking data	Comparative dynamics: M_{pre} vs. M_{post} (paired t-test) **Significance level:** $p < 0.01$	• Strengthened internal motivation • Increased reflective capacity • Higher professional readiness • Long-term sustainable development

Notation: M_{pre} — baseline mean score; M_{post} — post-intervention mean score; SD — standard deviation; SE — standard error; P — performance score; T — time expenditure; E — number of errors; w_i — weight of component; Iv_{max} — maximum possible weight; n — number of components; K_{struct} — structural coefficient; I_{dev} — development index; p — statistical significance level.

Statistical Significance Threshold: $p < 0.01$

Figure 1. Analytical framework for the systemic development of digital skills in specialty **A5** Professional Education (by specialization)

Source: compiled by the author

The analytical framework presented in Figure 1 integrates four structural components: **cognitive-informational, operational-technological, structural-integrative, and motivational-reflexive**. Each component was associated with a specific set of empirical characteristics and a corresponding functional direction. Such a structure made it possible to move from the assessment of individual manifestations of digital activity to the interpretation of their contribution to professional readiness.

The cognitive-informational component was associated with knowledge and information literacy. Its empirical manifestations included the baseline level of knowledge, efficiency of information search, theoretical understanding of relevant digital processes, and diagnostic assessment results. The component was interpreted as foundational because the ability to locate, select, understand, verify, and structure

information determines the quality of subsequent digital actions. The analytical emphasis was therefore placed not merely on access to information but on the ability to process it in a professionally meaningful way.

The operational-technological component reflected practical interaction with digital tools and the efficiency of their use. Its indicators included the baseline level of practical skills, frequency of software or tool use, accuracy of task execution, and efficiency and error characteristics. This component made it possible to establish whether participants could move from declarative knowledge about digital tools toward their effective practical application.

The structural-integrative component reflected the degree to which separate digital abilities were combined into a coherent system. Component weight distribution, structural balance, integration level, and the baseline readiness coefficient were considered in this analytical dimension. Its significance was determined by the fact that the development of separate abilities does not automatically result in their effective integration. Systemic digital readiness requires an appropriate balance between components and their coordinated functioning.

The motivational-reflexive component reflected the internal conditions supporting the sustainable development and professional application of digital skills. Motivation, reflective activity, professional readiness, and longitudinal tracking were included in its analytical field. This component was particularly important for distinguishing short-term operational improvement from the capacity for continued self-directed development.

The four-component structure was not treated as a rigid separation of independent domains. On the contrary, the components were interpreted as mutually conditioning elements of an integrated system. The cognitive-informational component provides the knowledge and information basis for digital activity; the operational-technological component enables practical realization; the structural-integrative component determines the coherence of these abilities; and the

motivational-reflexive component supports their purposeful, conscious, and sustainable development.

This interdependence explains why the structural analysis could not be reduced to ranking the four components according to their numerical values. The analytical task was to identify the configuration formed by their relationships. In this context, structural balance became an important characteristic of digital skills development. A system with a relatively high generalized score could nevertheless demonstrate internal asymmetry if one or more components were significantly less developed than the others.

The analytical procedure was consequently organized at several levels. First, the general distribution of participants according to the identified levels of digital skills development was established. Second, the results were decomposed according to the four structural components. Third, individual indicators were examined in order to determine the characteristics responsible for the observed component-level differences. Such hierarchical analysis allowed the initial state and subsequent dynamics to be interpreted without reducing the empirical evidence to generalized averages.

The distinction between the generalized and component levels was particularly important at the ascertaining stage. The initial measurement was intended not only to establish a numerical baseline but also to identify the internal structure of the phenomenon before the formative pedagogical influence. The baseline therefore became a structural profile against which subsequent changes could be compared.

The results of the ascertaining stage demonstrated that the initial development of digital skills was characterized by internal asymmetry. The participants generally demonstrated greater readiness for basic technological operations than for complex forms of pedagogical integration, information curation, autonomous problem-solving, and reflective use of digital resources. This finding is consistent with the analytical premise that operational familiarity with digital tools does not automatically result in professionally meaningful digital performance. The original empirical analysis

similarly identified structural asymmetries and functional fragmentation at the initial stage.

The importance of this finding lies not simply in the existence of lower results in particular areas but in the position of these areas within the overall structure. If information processing or practical tool use is relatively developed while integration and reflection remain insufficiently developed, the resulting system may support routine digital operations but remain limited in professional-pedagogical functionality. Therefore, the initial profile was interpreted in terms of both strengths and structural constraints.

Three analytical characteristics were used to distinguish different forms of developmental change: **magnitude, structural position, and functional significance**. Magnitude referred to the numerical extent of change. Structural position indicated the component or relationship in which the change occurred. Functional significance concerned the professional actions that could be supported by the resulting development. This three-dimensional interpretation prevented the empirical results from being reduced to a simple statement of percentage increase.

Table 1

Analytical levels of structural interpretation of empirical results

Analytical level	**Central question**	**Object of analysis**	**Expected interpretive result**
Architectonic	How is the phenomenon organized?	Components and their relationships	Structural configuration
Diagnostic	What was the initial state?	Criteria, indicators and levels	Baseline profile
Formative	What changed?	Dynamics of indicators and components	Developmental trajectory
Structural	Where did change occur?	Internal configuration of the system	Structural reconfiguration
Functional	What does the change enable?	Professional-pedagogical actions	Functional transformation
Integrated	What does the totality of changes mean?	Structure–function relationship	Empirical interpretation of the model

Source: compiled by the author

The analytical hierarchy presented in Table 1 was retained because it accurately represents the methodological logic of the empirical study. The architectonic level established the organization of the construct; the diagnostic level established the initial state; the formative level captured developmental dynamics; the structural level determined the location and configuration of change; and the functional level connected structural development with professional-pedagogical action. The integrated level subsequently allowed the totality of changes to be interpreted within the model. This hierarchy corresponds to the analytical scheme developed in the original material.

The ascertaining stage consequently performed a dual function. First, it provided the empirical baseline for subsequent comparison. Second, it revealed the internal configuration that determined the direction of the formative intervention. The latter function was particularly important because the pedagogical influence was not interpreted as an identical set of actions applied independently of the participants' initial state. Instead, the identified structural asymmetries provided the basis for understanding the areas that required purposeful developmental support.

The subsequent empirical analysis was therefore organized around the principle of methodological complementarity. The complexity of the investigated construct required the results to be examined not only in terms of the magnitude of observed change, but also in terms of its internal organization and manifestation in professional-pedagogical activity. Such an approach was necessary to determine whether the recorded developmental dynamics represented isolated improvement of particular digital operations or a broader transformation of the system of digital skills.

To strengthen the validity and interpretive reliability of the empirical findings, the study employed a comprehensive methodological triangulation strategy (Figure 2). The triangulation integrated quantitative statistical analysis, qualitative structural decomposition of digital skills, and functional pedagogical observation. These analytical perspectives were not treated as parallel or isolated procedures; rather, they were brought into systematic convergence to determine whether quantitative changes

corresponded to structural reconfiguration and whether such reconfiguration was manifested in professional-pedagogical activity. This approach made it possible to move beyond a purely numerical interpretation of developmental dynamics and to substantiate the systemic character of the observed transformation.

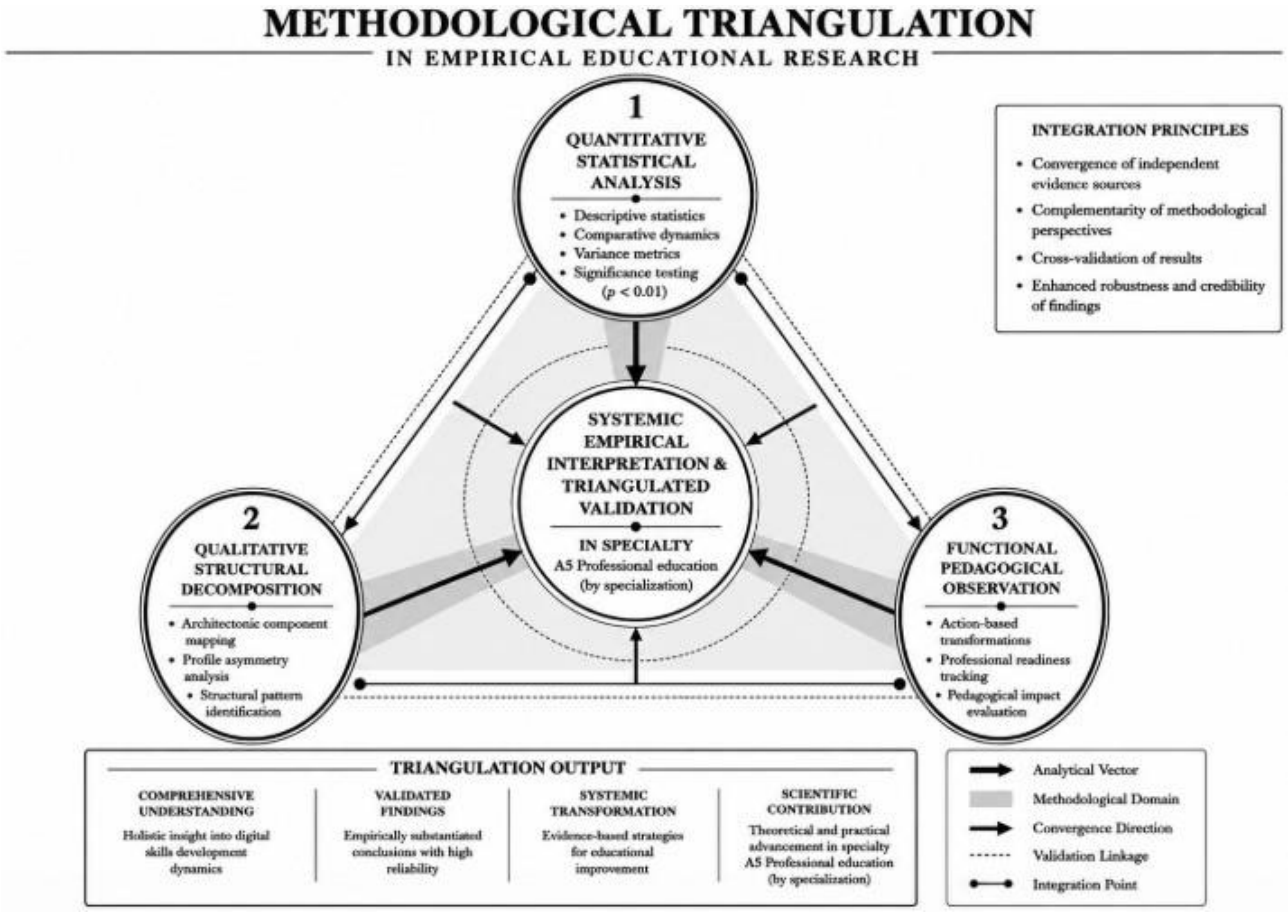

Figure 2. Methodological triangulation in empirical educational research

Source: developed by the author using a digital tool

The triangulation framework presented in Figure 2 established a methodological relationship between measurement, structural interpretation and functional verification. Quantitative evidence provided the empirical basis for identifying developmental dynamics, while structural decomposition clarified the organization of the changes within the architectonic model. Functional observation, in turn, made it possible to determine whether the identified structural developments acquired practical expression in professional-pedagogical activity. Thus, the three

perspectives addressed different analytical questions while remaining conceptually interconnected.

The value of this methodological configuration lies in the possibility of distinguishing quantitative growth from systemic development. An increase in an individual indicator may demonstrate that a particular ability has improved, but it does not necessarily indicate that the ability has become integrated into a coherent professional system. From this perspective, the experimental results were interpreted as a process of structural transformation rather than as a simple accumulation of separate digital abilities. The cognitive-informational and operational-technological dimensions provided an important basis for the acquisition and application of digital procedures, while the structural-integrative and motivational-reflexive dimensions determined the extent to which these procedures could be incorporated into purposeful professional activity. Their interrelationship was therefore considered more informative than the isolated level of any single component. The convergence of the three analytical perspectives also strengthened the interpretation of differences between the experimental and control trajectories. These differences were considered not merely as a distribution of participants across developmental categories, but as differences in the organization and functional expression of digital skills. The experimental trajectory was interpreted in terms of increasing coherence between digital knowledge, technological action, pedagogical purpose and reflection, whereas the control trajectory provided a comparative basis for distinguishing these changes from dynamics attributable to the ordinary educational process. Structural analysis makes it possible to identify the relationships among components, whereas functional observation determines whether these relationships support purposeful pedagogical action. The interpretation of developmental outcomes therefore depended on the convergence of evidence obtained through all three analytical perspectives.

The structural-integrative component therefore acquired particular analytical significance. Its purpose was not simply to measure another category of skills but to determine whether the separate components had become more balanced and

functionally interconnected. This analytical requirement highlighted the need for a framework capable of representing the relationships among the individual components as an integrated developmental system. Accordingly, an architectonic model was developed to conceptualize the progression from the initial diagnostic assessment through pedagogical intervention and structural transformation to final validation and longitudinal evaluation. Figure 3 presents the proposed developmental trajectory of digital skills, integrating the structural, functional, and analytical dimensions identified in the study.

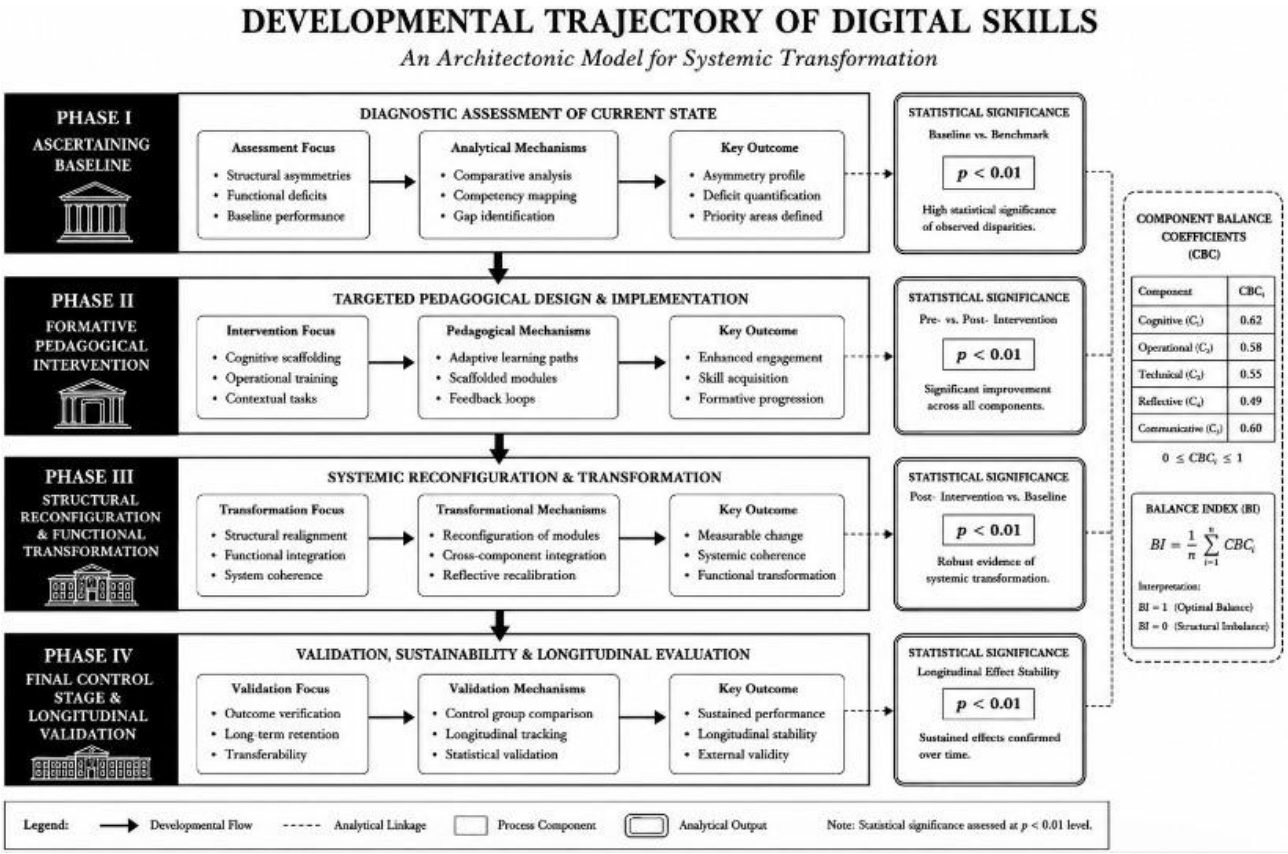

Figure 3. Developmental trajectory of digital skills: an architectonic model for systemic transformation

Source: compiled by the author

Figure 3 is particularly useful for demonstrating the continuity of the empirical logic. The developmental trajectory is represented through four phases: ascertaining baseline, formative pedagogical intervention, structural reconfiguration and functional transformation, and final control and longitudinal validation. This sequence corresponds to the methodological organization of the experiment and

demonstrates that structural development was considered a process rather than a single post-intervention measurement.

The first phase established the baseline through the identification of structural asymmetries, functional deficits, and baseline performance. The second phase introduced targeted pedagogical conditions involving cognitive scaffolding, operational training, and contextual tasks. The third phase was associated with systemic reconfiguration and transformation, including structural realignment, functional integration, and system coherence. The fourth phase was directed toward validation, sustainability, and longitudinal evaluation.

The value of this model lies in the fact that it connects empirical measurement with developmental logic. The baseline does not represent merely a starting number; it identifies the structure that is to be transformed. The formative intervention is not treated as an independent block of educational activity; it is connected with specific developmental mechanisms. The post-intervention measurement is not regarded as the final proof of effectiveness; it establishes the basis for subsequent verification of stability and transferability.

This logic is consistent with the original methodological interpretation, according to which the ascertaining stage established the initial configuration, the formative stage introduced purposeful pedagogical influences, and the comparative stage determined whether the observed changes were systemic or merely local.

The comparison between experimental and control groups provided an additional basis for determining whether the observed structural changes could be associated with the implemented pedagogical conditions. The control group demonstrated comparatively limited changes attributable to ordinary educational processes, whereas the experimental group demonstrated a more pronounced redistribution across development levels and a more balanced structural profile. Consequently, methodological triangulation became an integral component of the empirical argument of the study. It enabled the findings to be interpreted simultaneously as measurable dynamics, structural reconfiguration and functional

pedagogical transformation. Such an analytical configuration is particularly appropriate for the study of future vocational education teachers, since professional digital readiness cannot be adequately represented by technological proficiency alone. Its development is manifested through the increasingly coherent integration of information, technology, pedagogical judgment and reflection within professional activity. The original analysis interpreted this difference as evidence that the formative conditions affected the internal configuration of digital skills rather than producing isolated improvements in separate indicators.

The statistical dimension of the analysis was also incorporated into the structural interpretation. The methodological framework used descriptive statistics, comparative dynamics, performance indicators, and significance testing. The significance threshold adopted in the study was $p<0.01$. This threshold was used as the criterion for distinguishing statistically meaningful changes from fluctuations that could not be interpreted as sufficiently robust empirical evidence.

At the same time, statistical significance was not treated as a substitute for structural interpretation. A statistically significant change indicates that the difference is unlikely to be explained by random variation under the adopted statistical model, but it does not by itself explain the educational meaning of the change. The structural analysis therefore connected statistical evidence with component position, balance, and developmental trajectory.

This methodological position is essential for interpreting the results of a pedagogical experiment. If the experimental group demonstrates a statistically significant increase in an isolated technical indicator but the other components remain unchanged, the result should not automatically be interpreted as systemic development. Conversely, a coordinated improvement across several interconnected components, accompanied by greater structural balance, provides a stronger basis for concluding that the internal organization of digital skills has changed.

The empirical results therefore support the interpretation of development as **structural reconfiguration rather than simple numerical growth**. The original

study explicitly distinguished quantitative change from structural change: quantitative change concerned the increase or decrease of an individual numerical indicator, whereas structural change concerned modification of the relative configuration of components within the digital skills system.

This distinction also explains why the structural analysis was conducted in relation to professional preparation. Future vocational education teachers are expected not only to perform individual digital operations but also to integrate digital resources into educational activity, select appropriate technologies, work with digital information and content, organize interaction in digital environments, and apply digital tools according to pedagogical objectives. Consequently, the structural value of a digital skill is determined partly by its contribution to meaningful professional action.

The structural profile identified at the beginning of the experiment therefore served as a reference framework for interpreting the subsequent formative trajectory. A relatively balanced profile was understood as one in which the principal components demonstrated comparatively close development. A differentiated profile contained noticeable differences while retaining sufficient development across the system. An asymmetrical profile demonstrated pronounced dominance of some components accompanied by insufficient development of others. These distinctions were analytical rather than merely classificatory because they helped explain why participants with similar generalized scores could require different developmental interventions.

The structural analysis consequently demonstrated that the empirical development of digital skills should be understood as a movement from an initial configuration through targeted pedagogical influence toward a more balanced and integrated system. The evidence obtained at the ascertaining and formative stages did not support an interpretation based solely on isolated technical improvement. Instead, the observed changes indicated a reorganization of the relationships between

components, accompanied by a shift in the distribution of participants across development levels.

This conclusion creates a direct methodological transition to the second major part of the chapter. Once structural reconfiguration has been established, the next analytical question concerns its professional meaning: **what did these structural changes enable future vocational education teachers to do differently?** Answering this question requires moving from structural analysis to functional transformation and, ultimately, to an integrated structural-functional interpretation of the empirical results.

2. Functional transformation and structural-functional interpretation of the empirical results.

The structural changes established during the empirical study acquire their full scientific meaning only when their functional consequences are determined. For future vocational education teachers, digital skills are not an end in themselves. Their educational value is manifested through the capacity to use digital resources for solving professional-pedagogical tasks, designing learning environments, organizing interaction, processing educational information, monitoring learning outcomes, and adapting teaching strategies to changing conditions. Therefore, the functional analysis was conducted as a continuation of the structural analysis and was aimed at establishing how changes in the internal configuration of digital skills were manifested in professional activity.

The pedagogical experiment involved master's students enrolled in specialty A5 *Professional Education (by specialization)* in nine higher education institutions of Ukraine. Such an organizational scope made it possible to consider the obtained results in a broader institutional context and to avoid interpreting the observed changes as a phenomenon restricted to a single educational environment. The empirical material was therefore analyzed with attention to the common professional orientation of the participants while preserving the possibility of institutional variation.

The functional dimension was not interpreted as an independent layer added to the structural model after the fact. Rather, it was considered a manifestation of the degree to

which the structural components of digital skills had become coordinated and operationally meaningful. This distinction is important because the same technical operation can have fundamentally different professional value depending on the level of cognitive understanding, pedagogical integration, and reflective regulation accompanying it.

Accordingly, the central analytical transition was formulated as follows:

structural development → functional transformation → professional-pedagogical readiness.

This transition allowed the empirical results to be interpreted beyond formal measurement. A participant who successfully performs a technical operation demonstrates one type of digital ability. A participant who selects an appropriate digital tool for a particular educational purpose, integrates it into a learning scenario, monitors its effectiveness, and modifies the strategy when necessary demonstrates a qualitatively different level of professional digital readiness.

The functional analysis consequently focused on three principal domains: **information management, pedagogical integration, and digital problem-solving**. These domains were selected because they demonstrate particularly clearly whether digital activity remains fragmented or becomes integrated into professional-pedagogical action.

Table 2

Functional transformation of digital skills during the formative stage

Functional dimension	Ascertaining-stage manifestation	Formative-stage transformation	Professional implication
Information management	Fragmented retrieval and passive content consumption	Systematic filtering, verification, and structured digital archiving	Autonomous curation of vocational training content
Pedagogical integration	Mechanical application of standard presentation tools	Scenario-based deployment of interactive learning modules	Methodological alignment of digital tools with curriculum goals
Problem-solving	Reactive troubleshooting during technical failures	Proactive anticipation and algorithmic resolution of pedagogical bottlenecks	Uninterrupted orchestration of digital learning environments

Source: compiled by the author

The data presented in Table 2 demonstrate that the transformation was not reduced to an increase in the frequency of digital-tool use. In information management, the initial manifestation was characterized by fragmented retrieval and passive consumption of available content. The formative trajectory resulted in a transition toward systematic filtering, verification, and structured archiving. The professional consequence of this transformation was interpreted as the emergence of greater autonomy in curating content for vocational education.

Such a transition is methodologically significant because the contemporary vocational education teacher operates in an environment characterized by an abundance of digital information. The professional task is therefore not merely to locate an educational resource but to determine its relevance, reliability, pedagogical appropriateness, and potential for adaptation. The development observed during the formative stage indicates a movement from information access toward information management as a professional function.

The second domain, pedagogical integration, demonstrated an analogous but more complex transformation. At the ascertaining stage, digital tools were frequently associated with their most visible or standardized functions, particularly presentation and communication. During the formative stage, their use became increasingly connected with specific educational scenarios and interactive learning activities. Consequently, the professional meaning of digital-tool use shifted from mechanical application toward methodological alignment with curriculum objectives.

This transformation is especially important for professional education because vocational learning is closely connected with contextualized tasks, practical operations, simulation, demonstration, feedback, and the gradual acquisition of occupational skills. Digital tools become pedagogically meaningful when they support these processes rather than simply reproduce traditional instructional forms in a digital environment.

The third domain, problem-solving, demonstrated the transition from reactive to proactive behavior. At the initial stage, participants were more likely to respond to technical difficulties after they had emerged. During the formative stage, greater attention was directed toward anticipating potential barriers, constructing alternative sequences of action, and resolving pedagogical bottlenecks through planned digital procedures. The functional implication was an increased capacity to orchestrate digital learning environments rather than merely operate within them.

The three transformations are interconnected. Information management provides the content basis; pedagogical integration gives this content an instructional purpose; and problem-solving ensures that the digital environment remains functional when conditions change. Their combined development therefore provides stronger evidence of professional readiness than improvement in any single domain.

This relationship confirms the methodological principle that digital skills should be interpreted according to their **professional function**, not merely according to their technical form. A teacher may know how to operate a platform without being able to design an effective learning activity within it. Similarly, a teacher may be able to locate digital materials without being able to evaluate or restructure them for a particular group of vocational students. Functional development emerges when technical operations are subordinated to pedagogical purposes.

The empirical material revealed precisely this movement. Participants in the experimental group increasingly demonstrated the ability to use digital tools not as supplementary technological elements but as an operational environment for organizing learning. The formative stage consequently changed the relationship between the teacher and the digital environment: instead of adapting pedagogical activity to the available functions of a tool, participants increasingly selected and configured digital functions according to pedagogical objectives.

This finding makes it possible to reinterpret the quantitative results obtained during the experiment. Numerical growth in digital performance was not considered sufficient evidence of professional development unless it was accompanied by corresponding changes

in functional behavior. The original empirical analysis similarly emphasized that quantitative growth acquired significance when it resulted in expanded professional functionality.

The functional transformation also clarified the differences between the experimental and control groups. The comparative analysis indicated that participants in the control group retained a greater degree of operational fragmentation, whereas the experimental group demonstrated broader integration of digital operations into professional-pedagogical tasks. The resulting difference was interpreted not simply as a difference in the amount of digital activity but as a difference in the quality and purpose of that activity.

This distinction can be represented through the opposition between a **routine digital user** and a **methodical vocational educator**. The former is able to execute familiar operations within a digital environment. The latter is able to determine why a particular digital sequence is required, adapt it to a learning objective, modify it according to learner needs, and evaluate its effectiveness.

The empirical interpretation therefore moved beyond formal indicators of tool mastery. The relevant question was not whether participants knew particular software functions but whether they could adapt digital interfaces and workflows to the actual learning needs of vocational students. The original material identified this distinction as one of the central qualitative differences revealed by the experiment.

Table 3

From formal digital operations to professional-pedagogical functionality

Research dimension	**Surface-level interpretation**	**Structural-functional interpretation**
Tool mastery	Memorization of functions and interface operations	Adaptation of digital interfaces to specific learning needs
Content curation	Downloading ready-made digital materials	Filtering, redesigning, and synthesizing digital artifacts into coherent educational content
Classroom interaction	Conducting a standard online meeting	Orchestrating multichannel asynchronous tasks while monitoring individual learning progress

Source: compiled by the author

The transformation presented in Table 3 is particularly important for interpreting the professional trajectory of the participants. Tool mastery ceased to be understood as memorization of interface operations and was instead associated with the ability to adapt digital environments to particular learning needs. Content curation moved from downloading ready-made resources toward filtering, redesigning, and synthesizing materials. Classroom interaction evolved from conducting a standard online meeting toward the orchestration of multichannel learning activities.

These changes indicate that functional digital readiness involves a change in the **logic of professional action**. At the initial stage, the tool largely determined the sequence of action: the participant selected an available function and performed the corresponding operation. At the formative stage, the professional objective increasingly determined the selection and configuration of digital tools.

This inversion of the relationship between technology and pedagogy is one of the most important findings of the structural-functional interpretation. The digital environment is no longer treated as an external technological addition to teaching. It becomes an instrument whose configuration is determined by the pedagogical task.

The implications are particularly substantial for vocational education. Future teachers work with learners who require not only theoretical explanation but also demonstration, practice, feedback, contextualized tasks, and opportunities for independent performance. Digital environments can support these processes only when they are methodologically organized. Consequently, digital readiness must include the capacity to construct and regulate such environments rather than merely access them.

The empirical results further demonstrated that structural balance and functional development were closely associated. Participants who achieved a more balanced configuration of cognitive-informational, technological-operational, and reflective-evaluative components also demonstrated more advanced performance in complex functional tasks, including digital learning design and educational assessment. Conversely, participants whose structural profiles remained asymmetrical

continued to demonstrate limitations concentrated primarily in routine technological operations.

Table 4

Relationship between structural components and dominant functional consequences

Structural component	Dominant functional consequence	Level of systemic integration
Cognitive-informational	Systematic curation and critical filtering of digital content	High; foundational for pedagogical actions
Technological-operational	Autonomous deployment of interactive learning environments	Moderate; requires pedagogical framing
Pedagogical-integrative	Methodological alignment of digital tools with curriculum goals	High; core indicator of professional readiness
Reflective-evaluative	Self-correction, outcome monitoring, and adaptive design	Advanced; demonstrated predominantly by the experimental group

Source: compiled by the author

Table 4 provides a direct link between the internal structure of digital skills and their professional manifestation. The cognitive-informational component had a foundational role because systematic curation and critical filtering of digital content preceded meaningful pedagogical application. The technological-operational component enabled autonomous deployment of digital environments but did not by itself guarantee their methodological appropriateness. The pedagogical-integrative component connected digital operations with curriculum objectives and therefore represented a core indicator of professional readiness. The reflective-evaluative component supported self-correction, monitoring, and adaptive design and demonstrated the highest degree of complexity within the functional structure.

The relationship shown in Table 4 demonstrates why the structural and functional dimensions cannot be analyzed independently. The technological-operational component may provide the technical means for action, but the pedagogical-integrative component determines whether those means are educationally justified. Similarly, cognitive-informational development enables

informed selection of digital resources, whereas reflective-evaluative development makes it possible to assess the consequences of their use and modify subsequent actions.

This relationship can be expressed conceptually as follows:

Digital operation→Pedagogical integration→Professional action→ Reflection and adaptation

The sequence should not be interpreted as a strictly linear developmental algorithm. Rather, it represents a functional cycle in which each element reinforces the others. Professional action generates feedback; reflection modifies subsequent decisions; improved decisions influence the selection of digital tools; and accumulated experience contributes to further structural integration.

The integrated interpretation therefore provided a more adequate explanation of the empirical results than separate component statistics. The quantitative increments recorded during the formative stage acquired scientific significance only after they had been mapped onto their structural coordinates and functional consequences. The empirical evidence thus supported the interpretation of the implemented pedagogical conditions as a factor of systemic transformation of professional preparedness rather than isolated operational improvement.

A particularly important aspect of this interpretation was the differentiated developmental pace of the components. Technological and informational abilities demonstrated faster initial acceleration because participants were already familiar with many basic digital operations. Pedagogical integration and reflective self-correction developed more gradually because they required the coordination of several types of activity and a higher level of professional judgment. The resulting trajectory therefore confirmed that systemic development does not necessarily proceed at an equal rate across all structural dimensions.

This differentiated dynamic has an important methodological consequence. The duration and intensity of formative influence should be determined not only by the generalized level of digital readiness but also by the structural profile of

participants. Where technical operations are already relatively established, additional training focused exclusively on tool use may produce limited systemic effects. Greater developmental value may instead be obtained from tasks requiring integration, reflection, adaptation, and professional decision-making.

Thus, the initial structural asymmetry becomes not merely a diagnostic result but a predictor of the direction of subsequent pedagogical work. The experimental logic confirmed that the weaker components cannot be treated as isolated deficits. Their underdevelopment may restrict the functional realization of the stronger components and therefore reduce the overall professional value of digital skills.

The comparison of experimental and control groups further strengthened this interpretation. The experimental group demonstrated a more coherent transition from separate digital operations toward integrated professional actions, while the control group retained a greater degree of fragmentation. The contrast suggests that ordinary exposure to digital technologies is insufficient to guarantee the formation of professionally integrated digital skills. Purposeful pedagogical conditions are required to transform technical experience into structured professional capability.

The empirical evidence therefore allowed the architectonic model to be interpreted in a dual capacity. First, it functioned as a **diagnostic framework**, enabling the initial structural configuration to be identified and analyzed. Second, it functioned as a **developmental framework**, organizing the formative influence according to identified structural deficits and desired functional transformations. This dual role constitutes an important methodological result of the study.

3. Integrated structural-functional interpretation.

The convergence of structural and functional results demonstrated that the development of digital skills should be understood as a single process with two mutually conditioning dimensions. Structural change answers the question of **how the internal organization of digital skills changed**; functional transformation answers the question of **what these changes made possible in professional activity**.

The empirical material indicated that the two dimensions were not independent. A change in the cognitive-informational component affected the quality of information management; improvement in technological operations expanded the range of feasible digital actions; strengthening of pedagogical integration determined whether these actions corresponded to curriculum objectives; and development of reflection enabled participants to evaluate and adapt their decisions.

The integrated interpretation therefore did not simply add structural and functional indicators together. Instead, it examined the relationship between them. A numerical increase was considered particularly meaningful when it occurred in a structurally significant component and was accompanied by an observable expansion of professional functionality.

This principle provides an important methodological safeguard against overinterpretation of empirical data. For example, an increase in the frequency of software use cannot by itself establish professional digital readiness. The increase becomes educationally meaningful when the software is used purposefully, appropriately, independently, and reflectively within a professional task.

The same applies to information literacy. A participant's ability to find a large number of digital resources is insufficient if the participant cannot distinguish reliable information, adapt content to vocational education, organize it into a coherent learning sequence, and evaluate its relevance for a specific group of students.

Consequently, the decisive transition identified in the experiment was not from **low digital skill to high digital skill** in a purely quantitative sense. It was from **fragmented digital activity to structurally organized and functionally purposeful professional activity**.

This transition can be described through four interconnected transformations:

- **from access to information toward information curation;**
- **from tool operation toward pedagogical integration;**
- **from reactive troubleshooting toward proactive problem-solving;**
- **from external support toward reflective self-regulation.**

Together, these transformations characterize the movement from technological familiarity to professional digital readiness.

The resulting interpretation also changes the meaning of the experimental effect. The effect should not be represented exclusively by the percentage of participants who moved from one level to another. Such movement is important, but it is only one manifestation of the broader transformation. The deeper effect concerns the reorganization of the relationships between components and the expansion of professional functions supported by these components.

The empirical evidence consequently supports the conclusion that the formative intervention affected both **the structure of digital skills and the mode of their professional realization**. The experimental group demonstrated not merely more digital activity but greater coherence between knowledge, technological action, pedagogical purpose, and reflection.

4. Analytical basis for control-stage verification.

The formative results did not eliminate the methodological need for subsequent verification. On the contrary, the structural-functional interpretation identified several developmental dimensions whose stability required additional observation. These included the preservation of structural balance under more complex professional tasks, autonomous transfer of digital tools beyond controlled educational conditions, and the internalization of reflective self-correction without external scaffolding.

Therefore, the control stage was conceptualized as an integral part of the logic of the pedagogical experiment rather than as a formal final measurement. Its purpose was to determine whether the changes achieved during the formative stage retained their structural and functional integrity when participants were required to operate with greater autonomy.

Table 5

Methodological basis for control-stage verification

Methodological dimension	Formative-stage result	Control-stage verification focus
Structural stability	Reduction of initial asymmetries	Preservation of component equilibrium under complex tasks
Functional autonomy	Self-directed execution in controlled environments	Independent transfer of digital tools to professional settings
Reflective capacity	Emergence of self-correction mechanisms	Internalization of adaptive pedagogical design without external scaffolding

Source: compiled by the author

The logic of Table 5 follows directly from the unresolved developmental vectors identified during the integrated interpretation. Structural stability requires confirmation that the achieved balance is preserved rather than representing only a temporary effect. Functional autonomy requires evidence that participants can transfer the acquired ways of acting beyond the conditions in which they were explicitly supported. Reflective capacity requires evidence that adaptive decisions can be made independently rather than only in response to external prompts.

Because the available empirical material does not contain numerical results of a completed control measurement, these dimensions should not be presented as already statistically confirmed outcomes. They constitute **methodologically grounded verification criteria** derived from the completed formative stage. This distinction preserves the empirical integrity of the monograph and prevents prospective hypotheses from being represented as obtained evidence.

The control-stage logic also demonstrates the internal consistency of the architectonic model. The indicators selected for final verification are not arbitrary additions but follow directly from the weaknesses and developmental tendencies revealed during the earlier stages. Thus, the model determines not only what is measured but also what remains necessary to verify.

This methodological continuity is important for the scientific interpretation of the pedagogical experiment. The final validity of a developmental model cannot be established solely through evidence that change occurred immediately after formative influence. It also requires consideration of whether the acquired structure is sufficiently stable and whether its functional manifestations can be reproduced independently.

5. Professional trajectories: beyond formal metrics.

The most important qualitative consequence of the experiment concerns the change in the professional logic of digital activity. The empirical results demonstrate a transition from the role of the digital tool as an auxiliary instrument toward its role as a component of the teacher's professional operating environment.

At the initial stage, participants could use digital tools for individual tasks, but such use was not always connected with broader pedagogical design. During the formative stage, digital tools increasingly became integrated into the planning, implementation, monitoring, and adaptation of educational activity.

The resulting professional trajectory can therefore be represented as:

routine digital user → purposeful digital practitioner → methodical vocational educator

This trajectory should not be interpreted as a universal sequence of rigid stages. It represents a generalized analytical direction identified through the structural-functional interpretation of the empirical evidence.

The first position is characterized by the ability to perform familiar digital operations. The second involves purposeful selection and application of tools in accordance with a defined educational task. The third involves independent design, integration, monitoring, and adaptation of digital learning environments.

The transition is particularly visible in three areas. In tool mastery, participants moved from knowing functions toward adapting digital environments to learning needs. In content work, they moved from consuming available resources toward curating and redesigning them. In digital interaction, they moved from conducting

standard communication toward coordinating complex, multichannel learning processes.

These changes provide a substantive interpretation of the statistical results. They explain why a higher level of digital skill is educationally valuable only when it produces a corresponding expansion of professional action. The final criterion is therefore not technological sophistication as such but the ability to use digital resources consciously, independently, and pedagogically appropriately.

The experiment consequently demonstrated that professional digital readiness is a systemic characteristic. It emerges at the intersection of knowledge, technological proficiency, integration, motivation, and reflection. Its development cannot be reduced to the accumulation of software-specific skills because professional teaching requires continuous selection, adaptation, evaluation, and redesign.

The obtained results also indicate that digital readiness is dynamic rather than static. The ability to operate effectively in one digital environment does not guarantee readiness for all future environments. Sustainable readiness depends on the capacity to learn new tools, transfer existing principles to unfamiliar contexts, diagnose problems, and modify one's own professional actions.

For this reason, reflective development has a special role in the overall model. Technical knowledge can become outdated; specific platforms can change; interfaces can be redesigned; and educational environments can be disrupted. The ability to recognize a problem, identify the underlying pedagogical need, select an appropriate digital response, evaluate its effectiveness, and modify the action provides a more durable basis for professional digital development.

The structural-functional interpretation therefore places professional autonomy at the highest level of analytical significance. Autonomy does not mean acting without methodological principles or external resources. It means being able to independently organize digital professional activity, justify technological choices, adapt them to educational objectives, and evaluate the consequences.

Such an interpretation is especially relevant to the preparation of future vocational education teachers under conditions of rapid digital transformation. The professional environment in which graduates will operate cannot be reduced to a fixed set of platforms and applications. Therefore, the educational objective should be the formation of an integrated system of digital skills capable of supporting adaptation to changing technological and pedagogical conditions.

The empirical results obtained across the nine participating higher education institutions provide a basis for considering the architectonic model as a transferable analytical and developmental framework. At the same time, transferability should be understood cautiously. The model has demonstrated empirical viability within the investigated context, while its long-term generalizability requires further observation of graduates in actual vocational education institutions.

Thus, the completed pedagogical experiment provides evidence for the systemic nature of digital skills development, while the identified control-stage criteria define the next level of empirical verification. Future research may extend the analysis through longitudinal tracking of graduates and examination of how structural digital readiness is translated into sustained pedagogical innovation and institutional transformation. This prospective direction follows directly from the original research logic.

The integrated results therefore allow the main empirical proposition of the chapter to be formulated: **the effectiveness of digital skills development among future vocational education teachers is determined not by the isolated growth of technological indicators but by the degree to which cognitive, technological, integrative, and reflective components are structurally coordinated and transformed into purposeful professional-pedagogical action.**

The pedagogical experiment provides empirical support for this proposition. The experimental group demonstrated a more balanced structural profile and broader functional capabilities, while the control group retained a greater degree of operational fragmentation. The difference between the groups, therefore, should be

interpreted at both levels: as a difference in the quantitative distribution of development levels and as a difference in the qualitative organization of professional digital activity.

In this sense, the architectonic model has demonstrated its value not merely as a descriptive scheme but as an analytical instrument capable of connecting **diagnosis, development, structural transformation, functional manifestation, and empirical verification**. Its scientific significance lies precisely in this integration.

Conclusions. The conducted pedagogical experiment made it possible to establish the structural and functional dynamics of digital skills development among master's students of **A5 Professional Education (by specialization)** who participated in the study at nine higher education institutions of Ukraine. The results confirmed the relevance of interpreting digital skills as a multidimensional pedagogical construct rather than as a simple aggregate of technical abilities.

1. The ascertaining stage revealed a differentiated initial structure of digital skills. Pronounced asymmetries were identified between individual components, with basic technological operations and information retrieval being more developed than pedagogical integration, reflective evaluation and autonomous problem-solving.

2. The obtained baseline confirmed that a generalized numerical indicator cannot adequately characterize the actual state of digital skills development. The scientific interpretation of empirical results therefore required simultaneous consideration of the magnitude of change, the structural position of the corresponding indicator and its functional significance for future professional activity.

3. The formative intervention resulted in a reduction of the initial structural imbalance. The proportion of participants demonstrating lower levels decreased, while the representation of medium and higher levels increased. At the same time, the changes were not interpreted merely as quantitative growth, since the component-level analysis demonstrated a reconfiguration of the internal structure of digital skills.

4. The dynamics of the individual components were not uniform. Cognitive-informational and operational-technological dimensions demonstrated a

comparatively rapid initial response to the formative influence, whereas structural-integrative and motivational-reflexive dimensions developed more gradually but acquired greater stability. This confirms that the development of professional digital skills is a differentiated pedagogical process rather than a linear accumulation of technological operations.

5. Comparative analysis established a substantially more pronounced positive dynamic in the experimental group than in the control group. Whereas the control group demonstrated only limited fluctuations attributable to ordinary educational processes, the experimental group showed a statistically significant redistribution of structural components and a reduction of the asymmetries established at the beginning of the study.

6. The functional analysis demonstrated that the development of digital skills was accompanied by qualitative changes in professional-pedagogical activity. Participants moved from fragmented retrieval and passive consumption of digital content toward systematic filtering, verification and structured management of information resources.

7. A comparable transformation was identified in pedagogical integration. The formative trajectory facilitated a transition from mechanical use of standard presentation tools toward scenario-based deployment of interactive learning modules and methodological alignment of digital resources with curriculum objectives.

8. The problem-solving dimension also underwent qualitative transformation. Instead of predominantly reactive responses to technical difficulties, participants increasingly demonstrated proactive anticipation of pedagogical problems and algorithmic approaches to their resolution. This change expanded the functional meaning of digital skills from technical operation toward purposeful organization of digital learning environments.

9. The obtained results support the contemporary understanding that professional digital preparedness of teachers extends beyond instrumental technology use. Current research similarly emphasizes the multidimensional character of teacher

digital competence and the importance of combining technological, pedagogical, informational and reflective dimensions.

10. The findings are particularly relevant to vocational education, where digital skills must be connected with the specific requirements of professional training. Research on vocational teachers has demonstrated that digital competence is influenced by both individual and contextual factors, including attitudes toward technology, frequency of digital-tool use, workload and curriculum support. The present results extend this perspective by demonstrating the importance of structural balance and functional integration in the preparation of future vocational education teachers.

11. The pedagogical significance of the obtained results consists in demonstrating that purposeful formative conditions can facilitate movement from isolated digital operations toward integrated professional action. This conclusion corresponds with research indicating that teacher digital competence develops most effectively when technological skills are embedded in meaningful pedagogical contexts rather than treated as an autonomous technical domain.

12. The empirical verification therefore confirmed the dual function of the architectonic model. It can be used diagnostically to identify the initial configuration and structural asymmetries of digital skills, and developmentally to determine the direction of purposeful pedagogical intervention. The analytical value of the model lies precisely in connecting quantitative indicators with structural relationships and professional functions.

13. The results also indicate that the development of digital skills should not be considered complete when participants demonstrate confident operation of individual digital tools. Professional readiness requires the ability to select and critically evaluate digital resources, integrate them with curriculum objectives, design digital learning environments, solve emerging pedagogical problems and reflect on the effectiveness of one's own actions. This multidimensional interpretation is consistent with recent studies of pre-service teacher education and teacher digital skills.

In general, the pedagogical experiment substantiated the effectiveness of the proposed structural-functional approach to the development of digital skills of future vocational education teachers. The principal scientific result consists not simply in establishing positive quantitative dynamics, but in demonstrating the transition from **fragmented digital operations to a more balanced, integrated and professionally functional system of digital skills**. Further research should focus on longitudinal verification of the stability of the obtained changes and on determining how the developed digital readiness is transferred into independent professional activity in vocational education institutions.

References:

Basilotta-Gómez-Pablos, V., Matarranz, M., Casado-Aranda, L.-A., & Otto, A. (2022). Teachers' digital competencies in higher education: A systematic literature review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education, 19*, 8. DOI: 10.1186/s41239-021-00312-8

Bernsteiner, A. (2025). Teacher education in the age of digitality: Conclusions from a design-based research project. *European Journal of Education*. DOI: 10.1111/ejed.12904

Cattaneo, A. A. P., Antonietti, C., & Rauseo, M. (2022). How digitalised are vocational teachers? Assessing digital competence in vocational education and looking at its underlying factors. *Computers & Education, 176*, 104358. DOI**:** 10.1016/j.compedu.2021.104358

Chiu, T. K. F., Falloon, G., Song, Y., Wong, V. W. L., Zhao, L., & Ismailov, M. (2024). A self-determination theory approach to teacher digital competence development. *Computers & Education, 214*, 105017. DOI: 10.1016/j.compedu.2024.105017

Dai, W. (2023). An empirical study on English preservice teachers' digital competence regarding ICT self-efficacy, collegial collaboration and infrastructural support. *Heliyon, 9*(9), e19538. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19538

Fernández-Batanero, J. M., Román-Graván, P., Montenegro-Rueda, M., López-Meneses, E., & Fernández-Cerero, J. (2022). Digital teaching competence: A systematic review. *Sustainability, 14*(11), 6428. DOI: 10.3390/su14116428

Galimullina, E. Z., Ljubimova, E. M., Mukhametshina, D. R., & Sozontova, E. A. (2022). Analysis of requirements for the digital competence of a future teacher. *European Journal of Educational Research, 11*(3), 1729-1745. DOI: 10.12973/eu-jer.11.3.1729

Gisbert Cervera, M., & Caena, F. (2022). Teachers' digital competence for global teacher education. *European Journal of Teacher Education, 45*(4), 451-455. DOI: 10.1080/02619768.2022.2135855

Guillén-Gámez, F. D., Ruiz-Palmero, J., & Gómez García, M. (2023). Digital competence of teachers in the use of ICT for research work: Development of an instrument from a PLS-SEM approach. *Education and Information Technologies, 28*, 16509-16529. DOI: 10.1007/s10639-023-11895-2

Heine, S., Krepf, M., & König, J. (2023). Digital resources as an aspect of teacher professional digital competence: One term, different definitions – a systematic review. *Education and Information Technologies, 28*, 3711-3738. DOI: 10.1007/s10639-022-11321-z

Kaminskienė, L., Järvelä, S., & Lehtinen, E. (2022). How does technology challenge teacher education? *International Journal of Educational Technology in Higher Education, 19*, 64. DOI: 10.1186/s41239-022-00375-1

Kuznietsov Y., Dobroskok I. (2026). Integration of innovative tools into practical training of future vocational education teachers: a conceptual and empirical study. *Methodological Innovations*. *2*(1)9. 2026. DOI: 10.1177/20597991261470885

Kuznietsov, Y. (2026). Conceptual model of digital skills development for future teachers of vocational education institutions. *Professional Pedagogics, 1*(32), 18-27. DOI: 10.32835/2707-3092.2026.32.18-27

Кузнєцов Є. (2025). Особливості констатувального етапу педагогічного експерименту при дослідженні рівня сформованості цифрових навичок магістрантів професійної освіти. *Наукові інновації та передові технології (Серія: Педагогіка). 12*(52). 1823-1834. DOI: 10.52058/2786-5274-2025-12(52)-1823-1834

Llorente-Cejudo, C., Barragán-Sánchez, R., Puig-Gutiérrez, M., et al. (2023). Social inclusion as a perspective for the validation of the "DigCompEdu Check-In" questionnaire for teaching digital competence. *Education and Information Technologies, 28*, 9437-9458. DOI: 10.1007/s10639-022-11273-4

Myyry, L., Kallunki, V., Katajavuori, N., Repo, S., Tuononen, T., Anttila, H., Kinnunen, P., Haarala-Muhonen, A., & Pyörälä, E. (2022). COVID-19 accelerating academic teachers' digital competence in distance teaching. *Frontiers in Education, 7*, 770094. DOI: 10.3389/feduc.2022.770094

Ng, D. T. K., Leung, J. K. L., Su, J., Ng, R. C. W., & Chu, S. K. W. (2023). Teachers' AI digital competencies and twenty-first century skills in the post-pandemic world. *Educational Technology Research and Development, 71*, 137-161. DOI: **10.1007/s11423-023-10203-6**

Sathya, M., & Alamelu, R. (2026). SmartPD: A design-based research model for enhancing teacher digital competence aligned with DigCompEdu. *Journal of New Approaches in Educational Research, 15*, 5. DOI: 10.1007/s44322-026-00052-5

Solórzano, C. M. V., et al. (2022). The digital competence of academics in higher education: Is the glass half empty or half full? *International Journal of Educational Technology in Higher Education, 19*. DOI: 10.1186/s41239-022-00376-0

Suzer, E., & Koc, M. (2024). Teachers' digital competency level according to various variables: A study based on the European DigCompEdu framework in a large Turkish city. *Education and Information Technologies, 29*, 22057-22083. DOI: 10.1007/s10639-024-12711-1

Tomczyk, Ł. (2024). Digital competence among pre-service teachers: A global perspective on curriculum change as viewed by experts from 33 countries. *Evaluation and Program Planning, 105*, 102449. DOI: 10.1016/j.evalprogplan.2024.102449

Xin, Y., Tang, Y., & Mou, X. (2024). An empirical study on the evaluation and influencing factors of digital competence of Chinese teachers for TVET. *PLOS ONE, 19*(9), e0310187. DOI: 10.1371/journal.pone.0310187

Zhong, Z., & Juwaheer, S. (2024). Digital competence development in TVET with a competency-based whole-institution approach. *Vocational Education and Training*. DOI: 10.54844/vte.2024.0591

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-365
UDC 373.3:502/504

CHAPTER 11.
THEORETICAL AND PEDAGOGICAL FOUNDATIONS FOR DEVELOPING PRIMARY SCHOOL PUPILS' EMOTIONAL AND VALUE-BASED ATTITUDES TOWARD NATURE

Iryna MOZUL
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Theory and
Methods of Primary Education,
Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University,
(Hlukhiv, Ukraine)
mozul.dubok@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-8331-9011

Abstract. The article theoretically substantiates the pedagogical foundations for developing primary school pupils' emotional and value-based attitudes toward nature in the context of the New Ukrainian School. The essence of an emotional and value-based attitude toward nature is revealed as an integrated personal construct that combines cognitive, emotional, value-based, and activity-related components. The age-related prerequisites for its development in primary school pupils are characterized, and the content and means of environmental education are identified, including observation, excursions, practical, inquiry-based and research activities, as well as play-based and creative activities. A set of interrelated pedagogical conditions is substantiated, including a personality-oriented approach to environmental education, the cross-curricular integration of environmental issues into the educational process, the creation of an emotionally supportive natural-science educational environment, pupils' involvement in practical and research activities, the use of activity-based, interactive, and research methods, and cooperation among the educational institution, family, and community. The criteria and manifestations of a developed attitude toward nature are outlined, including emotional sensitivity, value awareness, intrinsic motivation, responsible behavior, environmental initiative, and reflection. Prospects for further research are identified, focusing on the development and experimental validation of a methodology for fostering primary school pupils' emotional and value-based attitudes toward nature.

Keywords: primary education, New Ukrainian School, educational process, younger schoolchildren, primary school pupils, emotional and value-based attitude, nature, environment, environmental education, environmental competence.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПЕДАГОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ЕМОЦІЙНО-ЦІННІСНОГО СТАВЛЕННЯ МОЛОДШИХ ШКОЛЯРІВ ДО ПРИРОДИ

Анотація. У статті теоретично обґрунтовано педагогічні засади формування емоційно-ціннісного ставлення молодших школярів до природи в умовах Нової української школи. Розкрито сутність емоційно-ціннісного ставлення до природи як інтегрованого особистісного утворення, що поєднує когнітивний, емоційний, ціннісний і діяльнісний компоненти. Охарактеризовано вікові передумови його формування в учнів початкової школи, визначено зміст і засоби екологічного виховання, зокрема спостереження, екскурсії, практичну, пошуково-дослідницьку, ігрову та творчу діяльність. Обґрунтовано комплекс взаємопов'язаних педагогічних умов, що передбачає особистісну орієнтацію екологічного виховання, наскрізне інтегрування екологічної проблематики в освітній процес, створення емоційно сприятливого природничого освітнього середовища, залучення учнів до практичної та дослідницької діяльності, використання діяльнісних, інтерактивних і дослідницьких методів, а також взаємодію закладу освіти, родини та громади. Окреслено критерії та прояви сформованого ставлення до природи, що виявляються в емоційній чутливості, ціннісному усвідомленні, внутрішній мотивації, відповідальній поведінці, екологічній ініціативності та рефлексії. Визначено перспективи подальшого дослідження проблеми, пов'язані з розробленням і експериментальною перевіркою методики формування емоційно-ціннісного ставлення до природи в учнів початкових класів.

Ключові слова: початкова освіта, Нова українська школа, освітній процес, молодші школярі, учні початкових класів, емоційно-ціннісне ставлення, природа, довкілля, екологічне виховання, екологічна компетентність.

Вступ. Сучасні суспільні трансформації відбуваються в умовах загострення екологічних проблем, що дедалі виразніше вказують на порушення гармонійної взаємодії між людською діяльністю та природним середовищем. Інтенсивне використання природних ресурсів, забруднення атмосферного повітря, водних об'єктів і ґрунтового покриву, зменшення біологічного різноманіття, руйнування та деградація природних екосистем є проявами масштабних змін у системі «людина–природа». Зазначені тенденції актуалізують необхідність переосмислення способів взаємодії суспільства з довкіллям та формування відповідального ставлення до природних ресурсів. За таких обставин екологічна проблематика виходить далеко за межі суто природничої чи

економічної площини, набуваючи водночас соціального, морально-етичного та педагогічного виміру. Особливого значення при цьому набуває своєчасне формування в підростаючого покоління усвідомлення самоцінності природи, розуміння залежності людини від стану довкілля та відповідальності за наслідки власної діяльності.

Важливим суспільним механізмом впливу на становлення такого ставлення є освіта, яка володіє значними можливостями для формування екологічно відповідальної особистості. Особливої уваги в цьому контексті потребує початкова школа, адже саме в молодшому шкільному віці активно розвиваються світоглядні уявлення дитини, її система цінностей, ставлення до інших людей, суспільства, природи та навколишнього світу загалом. У цей період закладаються основи морально-етичної поведінки, розвиваються відповідальність, співчуття, доброзичливість, здатність оцінювати власні вчинки й усвідомлювати їхні можливі наслідки.

Відповідні орієнтири знайшли відображення в Концепції Нової української школи, у якій одним із пріоритетів визначено розвиток ключових компетентностей і ціннісних орієнтацій здобувачів освіти. У цьому контексті екологічна компетентність розглядається не лише як результат оволодіння знаннями про закономірності функціонування природи та взаємозв'язки в природному середовищі. Вона передбачає також здатність особистості застосовувати набуті знання у практичній діяльності, відповідально ставитися до власних дій, прогнозувати їхні наслідки та дотримуватися принципів безпечної й сталої взаємодії з природою.

Тому екологічне виховання учнів початкових класів не може обмежуватися передаванням і засвоєнням сукупності природничих відомостей. Його важливим завданням є створення умов для особистісного осмислення дитиною цінності природи, емоційного переживання взаємозв'язку з нею та вироблення готовності до відповідальної поведінки.

Постановка проблеми. З огляду на це особливої актуальності набуває проблема становлення в молодших школярів емоційно-ціннісного ставлення до природи. Саме наявність природничих знань ще не є достатньою передумовою екологічно доцільної поведінки. Учень може добре знати правила поведінки в природі, розуміти неприпустимість руйнування пташиних гнізд, знищення рослин або забруднення водойм, однак такі знання не завжди автоматично визначають його реальні вчинки. Перетворення інформації на внутрішньо прийняту норму поведінки відбувається тоді, коли знання поєднуються з особистісним переживанням їхньої значущості. Саме емоційний зв'язок із природою, здатність співпереживати живим організмам, захоплюватися красою природного світу та усвідомлювати власну відповідальність за його збереження створюють підґрунтя для переходу від формального знання екологічних правил до внутрішньої потреби діяти відповідно до них.

Емоційно-ціннісне ставлення до природи є складним особистісним утворенням, становлення якого охоплює взаємопов'язані когнітивну, емоційну, ціннісну та діяльнісну сфери. Його зміст виявляється в тому, що дитина знає, відчуває, усвідомлює як значуще та реалізує у власній поведінці. Безпосереднє спілкування з природою, спостереження за її об'єктами і явищами, переживання краси природного довкілля, вияв співчуття до живих істот сприяють виникненню позитивного емоційного досвіду. Водночас поглиблення уявлень про взаємозалежність природних компонентів і роль людини в системі «людина – природа» дає змогу перевести цей досвід на рівень усвідомлених ціннісних орієнтацій. Їх подальше закріплення у практичній діяльності створює основу для формування стійкої екологічної позиції особистості.

Разом із тим аналіз освітньої практики дає підстави стверджувати, що екологічне виховання молодших школярів не завжди реалізується як цілісний і системно організований процес. Робота з екологічної проблематики часто представлена окремими бесідами, спостереженнями, екскурсіями, практичними завданнями чи природоохоронними акціями, які можуть залишатися

недостатньо пов’язаними між собою. За відсутності системності такі форми роботи не завжди забезпечують послідовне поєднання знань дитини про природу з її емоційними переживаннями, ціннісними орієнтаціями та реальною діяльністю. Відтак виникає необхідність не лише урізноманітнення змісту і методів екологічного виховання, а й визначення комплексу педагогічних умов, здатних забезпечити його цілісність, послідовність та особистісну значущість.

Отже, актуальність проблеми зумовлена потребою в теоретичному обґрунтуванні та систематизації педагогічних умов, які сприятимуть ефективному формуванню емоційно-ціннісного ставлення молодших школярів до природи в освітньому процесі Нової української школи. Йдеться про створення такого педагогічного середовища, у якому екологічні знання, позитивні емоційні переживання, ціннісне осмислення природи та практична діяльність учнів утворюватимуть взаємопов’язану систему, спрямовану на становлення екологічно відповідальної особистості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема взаємозв’язків людини з природним середовищем, становлення ціннісних орієнтацій особистості та виховання гуманного ставлення до навколишнього світу належить до кола питань, які тривалий час перебувають у полі уваги педагогічної та психологічної науки. Теоретичні засади розвитку ціннісної сфери особистості, формування моральних якостей, гуманістичних переконань і відповідального ставлення до навколишньої дійсності розкрито у працях І. Беха, Л. Демчук, Г. Жирської, Л. Крамар, Л. Малинівської та інших учених *(Бех І., 2020; Демчук Л., 2003; Жирська Г., 2014; Крамар Л., 2014; Малинівська Л., 2008)*. У наукових напрацюваннях цих авторів простежується положення про те, що ціннісне ставлення особистості не формується ізольовано від її емоційного та морального досвіду, а є результатом поступового засвоєння суспільно значущих норм і цінностей та їх перетворення на внутрішні особистісні орієнтири.

Особливого значення для розуміння досліджуваної проблеми мають праці, у яких розглядаються психологічні та педагогічні передумови формування емоційно-ціннісного ставлення дитини до природного довкілля. Цей аспект представлено в дослідженнях О. Михайлик, Л. Пономаренко, О. Тирон, Ю. Шаульської, К. Шевчук *(Михайлик О., 2013; Пономаренко Л., 2010; Шаульська Ю., 2012; Шевчук К., Тирон О., 2021)*. Науковці акцентують увагу на ролі емоційних переживань у процесі взаємодії дитини з природою, значенні пізнавального інтересу, особистісного досвіду, безпосереднього спостереження та практичного контакту з об'єктами і явищами довкілля. Такий підхід дає підстави розглядати природу не лише як джерело пізнавальної інформації, а й як важливий чинник емоційного та морально-ціннісного розвитку особистості молодшого школяра.

Значний інтерес для нашого дослідження становлять наукові праці, присвячені визначенню та обґрунтуванню педагогічних умов екологічного виховання учнів. Відповідна проблематика висвітлюється у працях Р. Агейкіної, Г. Зозулі, І. Мозуль, В. Чалої та інших дослідників *(Зозуля Г., Агейкіна Р., 2012; Мозуль І., 2025; Чала В., Депетист О., Ярова Н., 2013)*. Учені розглядають екологічне виховання як цілеспрямований педагогічний процес, ефективність якого визначається сукупністю взаємопов'язаних чинників та умов. Серед важливих положень, представлених у цих дослідженнях, виокремлюємо необхідність комплексного педагогічного впливу, урахування вікових та індивідуально-психологічних особливостей дітей, залучення їх до різноманітних видів діяльності, а також створення сприятливого емоційного середовища для розвитку особистісного ставлення до природи.

Водночас методичні можливості організації екологічного виховання учнів молодшого шкільного віку розкрито в дослідженнях Л. Білик, Л. Крамар, Ю. Шаульської та інших науковців *(Білик Л., 2004; Крамар Л., 2014; Шаульська Ю., 2012)*. У працях зазначених авторів обґрунтовується доцільність використання різноманітних форм і методів роботи, здатних забезпечити

безпосередню взаємодію дитини з природним довкіллям. Зокрема, значний потенціал мають систематичні спостереження за природними об'єктами та сезонними змінами, екскурсії, практичні природоохоронні завдання, елементи проєктної та дослідницької діяльності, використання художнього слова, творів мистецтва, літературних і фольклорних матеріалів. Застосування таких засобів дає змогу поєднати пізнавальний зміст екологічної освіти з емоційним переживанням дитиною краси та різноманіття природи.

Окремі аспекти формування саме емоційно-ціннісного ставлення молодших школярів до природи розглянуто у працях Г. Жирської, К. Магрламової, С. Русової та інших авторів *(Жирська Г., 2014; Магрламова К., 2008; Русова С., 2006)*. Їхні наукові позиції дають змогу стверджувати, що результативність екологічного виховання значною мірою залежить від того, наскільки зміст освітнього процесу спрямований на розвиток не лише пізнавальної активності учнів, а й їхніх почуттів, переживань, моральних установок та ціннісного ставлення до живого світу. Важливим є створення ситуацій, у яких дитина має можливість не просто отримати інформацію про природу, а емоційно відреагувати на побачене, усвідомити його значення та виявити власне ставлення у практичній діяльності.

Питання вибору ефективних методів, форм і засобів екологічного виховання також посідає помітне місце у дослідженнях Л. Білик, О. Грошовенко, Р. Жигайлової, П. Ткаченка та інших науковців *(Білик Л., 2004; Грошовенко О., 2015; Жигайлова Р., 2012; Ткаченко П., 2015)*. Учені звертають увагу на необхідність активізації суб'єктної позиції дитини, залучення її до різних видів практичної діяльності, організації спостережень, дослідів, творчих і проєктних завдань. Принциповим у цьому контексті є перехід від переважно інформаційного способу подання екологічного змісту до діяльнісного, за якого учень отримує можливість самостійно досліджувати природні явища, встановлювати причинно-наслідкові зв'язки, робити висновки та практично реалізовувати набуті знання.

Важливим теоретичним підґрунтям сучасного розуміння екологічного виховання є також положення про необхідність єдності інтелектуального, емоційного, ціннісного та поведінкового компонентів розвитку особистості. У цьому аспекті сформованість позитивного ставлення до природи доцільно пов'язувати не тільки з обсягом засвоєних учнем природничих знань, а й із характером його емоційного реагування, усвідомленням значущості природного довкілля та готовністю реалізовувати відповідні цінності у повсякденній поведінці. Саме таке розуміння проблеми набуває особливої актуальності в умовах компетентнісної парадигми сучасної початкової освіти.

Важливим теоретичним підґрунтям сучасного розуміння екологічного виховання є положення про взаємозв'язок пізнавального, емоційного, ціннісного та діяльнісного складників ставлення особистості до природи. Формування такого ставлення не обмежується засвоєнням природничих знань, а передбачає розвиток емоційних переживань, усвідомлення значущості природного довкілля та готовності виявляти відповідне ставлення у практичній діяльності. Такий підхід простежується у працях, присвячених формуванню ціннісного ставлення до природи та його ролі в екологічному вихованні молодших школярів *(Жирська Г., 2014; Мозуль І. В., 2025; Шевчук К., Тирон О., 2021).*

Аналіз наукових джерел засвідчує, що проблема екологічного виховання молодших школярів досліджена в різних аспектах: від теоретико-філософського осмислення взаємодії людини і природи до розроблення конкретних методів і форм педагогічної роботи. Водночас наявні дослідження переважно зосереджуються на окремих складових означеної проблематики – розвитку екологічних знань, формуванні компетентностей, організації природоохоронної діяльності, використанні окремих методів або розвитку емоційної сфери. Це свідчить про значний науковий доробок, але водночас актуалізує необхідність подальшого системного осмислення процесу формування емоційно-ціннісного ставлення дитини до природи.

Попри вагомі результати попередніх досліджень, сучасні трансформації змісту й організації початкової освіти зумовлюють потребу в подальшому розвитку відповідних теоретико-методичних положень. Особливої уваги потребує проблема забезпечення цілісності екологічного виховання в умовах Нової української школи, де важливого значення набувають особистісна орієнтація освітнього процесу, компетентнісний підхід, діяльнісне навчання, інтеграція змісту різних освітніх галузей та формування системи цінностей учня. За таких умов емоційно-ціннісне ставлення до природи має розглядатися не як окремий результат проведення природоохоронних заходів, а як поступово сформоване особистісне утворення, що виявляється у знаннях, почуттях, ціннісних судженнях і практичних діях дитини.

Недостатньо розробленим, на нашу думку, залишається питання системного поєднання емоційного, ціннісного та діяльнісного складників екологічного виховання молодших школярів. Потребує подальшого теоретичного обґрунтування й комплекс педагогічних умов, які забезпечували б не ситуативний інтерес до окремих природних об’єктів чи явищ, а стійке позитивне ставлення дитини до природи та готовність дбати про неї у повсякденному житті. Саме ця обставина визначає необхідність уточнення змісту, взаємозв’язку та педагогічного забезпечення умов, спрямованих на ефективне формування емоційно-ціннісного ставлення молодших школярів до природи в освітньому середовищі Нової української школи.

Теоретичне осмислення емоційно-ціннісного ставлення до природи. Ставлення особистості до природи є складним і багатовимірним феноменом, дослідження якого перебуває на перетині психології, педагогіки, етики, естетики та соціальних наук. Його сутність не вичерпується рівнем засвоєння дитиною певного обсягу екологічних знань чи інформації про навколишній світ. Взаємодія людини з природою передбачає значно ширший спектр особистісних виявів, у межах яких пізнавальний досвід поєднується з емоціями,

ціннісними орієнтаціями, моральними переконаннями та конкретними способами поведінки.

У педагогічному розумінні емоційно-ціннісне ставлення до природи можна трактувати як інтегровану характеристику особистості, що проявляється у позитивному емоційному реагуванні на природне довкілля, усвідомленні його значущості, здатності до співпереживання живим істотам, прагненні виявляти турботу про природні об'єкти та готовності дотримуватися екологічно доцільної поведінки. Отже, йдеться не лише про те, що дитина знає про природу, а й про те, як вона її сприймає, яке місце відводить їй у власній системі цінностей і як це ставлення реалізує у практичній діяльності.

Емоційно-ціннісне ставлення має внутрішньо структурований характер і охоплює декілька взаємопов'язаних складників. Когнітивний компонент становлять знання учнів про природні об'єкти та явища, закономірності їх функціонування, взаємозалежність компонентів природи, а також можливі наслідки антропогенного впливу на довкілля. Емоційний компонент пов'язаний із характером переживань, які виникають у процесі безпосереднього або опосередкованого контакту дитини з природою: почуттям радості, захоплення, подиву, милування, співчуття, турботи, а також занепокоєнням щодо негативних змін у природному середовищі. Ціннісний компонент передбачає усвідомлення природи як значущої та самоцінної складової життя людини й суспільства, розуміння необхідності її збереження та відповідального ставлення до природних ресурсів. Діяльнісний компонент знаходить своє безпосереднє вираження у вчинках і поведінкових практиках учня, спрямованих на охорону природи, дбайливе використання її ресурсів та запобігання негативному впливу на довкілля.

Таким чином, становлення емоційно-ціннісного ставлення до природи можна розглядати як поступовий процес, у якому взаємодіють кілька послідовних і водночас взаємопов'язаних етапів: пізнання природи – емоційний відгук – усвідомлення її цінності – особистісне прийняття цінностей –

практична реалізація у поведінці. Важливо, що ці ланки не існують відокремлено одна від одної. Знання створюють основу для розуміння природних взаємозв'язків, емоційні переживання надають цьому знанню особистісного смислу, ціннісне осмислення сприяє його внутрішньому прийняттю, а діяльність забезпечує практичне втілення сформованих переконань. Якщо ж освітній процес обмежується переважно передаванням природничої інформації, екологічне виховання може набути формального характеру й не привести до відповідних поведінкових змін.

Тому одним із ключових завдань сучасної початкової освіти є забезпечення органічного взаємозв'язку знань, емоційних переживань, ціннісних орієнтацій та практичної діяльності учнів. Такий підхід відповідає особистісно орієнтованій та компетентнісній спрямованості Нової української школи, у межах якої важливим результатом освітнього процесу є не тільки засвоєння учнем певної інформації, а й формування здатності використовувати її у життєвих ситуаціях, приймати відповідальні рішення та діяти відповідно до засвоєних цінностей.

Теоретичні положення щодо виховання гуманного ставлення особистості до природи, розвитку її морально-ціннісної сфери та формування відповідального ставлення до навколишнього середовища знайшли відображення у працях І. Беха, Л. Демчук, Г. Жирської, Л. Крамар, Л. Малинівської, О. Михайлик, І. Мозуль, О. Тирон, Ю. Шаульської, К. Шевчук та інших дослідників *(Бех І., 2020; Демчук Л., 2003; Жирська Г., 2014; Крамар Л., 2014; Малинівська Л., 2008; Михайлик О., 2013; Мозуль І., 2025; Шаульська Ю., 2012; Шевчук К., Тирон О., 2021)*. Аналіз їхніх наукових позицій дає підстави розглядати взаємодію дитини з природним довкіллям як важливий чинник становлення її емоційної, моральної та ціннісної сфер.

Принципово важливим у цьому контексті є положення про те, що природа в освітньому процесі має виступати не тільки предметом пізнання, а й простором особистісного досвіду, емоційного переживання та практичної

взаємодії. Для формування відповідального ставлення недостатньо, щоб учень міг назвати рослини, тварин або природні явища та відтворити правила поведінки в довкіллі. Значно важливішим є його здатність побачити цінність живого, відчути красу природного світу, помітити зміни в ньому, зрозуміти взаємозалежність природних компонентів та усвідомити власну причетність до збереження довкілля. Саме особистісно значущі переживання й досвід діяльності поступово перетворюють зовнішні вимоги та правила на внутрішні переконання дитини.

Сучасні зарубіжні дослідження також підкреслюють значення безпосереднього та емоційно насиченого контакту дітей із природою для розвитку їхнього зв'язку з природним середовищем. Зокрема, A. Barrable та D. Booth розглядають nature connection як важливий напрям роботи з дітьми та наголошують на значенні досвіду взаємодії з природою для формування позитивного ставлення до неї *(Barrable A., Booth D., 2020)*.

У цьому аспекті особливого значення набуває безпосередній контакт молодших школярів із природою. Спостереження, дослідження, догляд за рослинами й тваринами, участь у природоохоронних заходах, виконання практичних завдань та обговорення результатів власної діяльності створюють можливості для поєднання пізнавального й емоційного досвіду. Дитина не лише отримує інформацію про певний природний об'єкт, а й набуває власного досвіду взаємодії з ним, що підсилює особистісну значущість отриманих знань. У результаті екологічні цінності набувають для учня конкретного змісту та можуть ставати орієнтирами його повсякденної поведінки.

Отже, емоційно-ціннісне ставлення до природи доцільно розглядати як важливу складову екологічної культури особистості, яка характеризує не стільки обсяг засвоєної природничої інформації, скільки ступінь її особистісного осмислення та прийняття. Його сформованість виявляється у здатності учня емоційно відгукуватися на природні явища, усвідомлювати значущість природи, виявляти турботу про живе та реалізовувати екологічно ціннісні орієнтації у

власній діяльності. Саме тому результативність екологічного виховання молодших школярів варто пов'язувати з переходом від знання про природу до її особистісного переживання, від усвідомлення цінності – до відповідального вчинку.

Вікові передумови формування ставлення до природи в учнів початкової школи. Молодший шкільний вік є сприятливим періодом для становлення емоційно-ціннісного ставлення дитини до природи. У цей час відбуваються помітні зміни в розвитку пізнавальної діяльності, емоційно-вольової та моральної сфер особистості, удосконалюється здатність усвідомлювати власні вчинки, оцінювати їх та розуміти мотиви поведінки інших людей. Поступово дитина переходить від переважно безпосереднього сприймання навколишньої дійсності до її свідомого осмислення й встановлення певних взаємозв'язків. Водночас емоційне ставлення до подій, явищ і об'єктів довкілля продовжує залишатися важливим чинником пізнання та особистісного розвитку.

Однією з характерних рис цього вікового періоду є емоційна відкритість і безпосередність переживань. Молодші школярі виявляють природну допитливість, активно цікавляться новим, прагнуть досліджувати навколишній світ і краще пізнають його через власний досвід. Природне довкілля при цьому становить особливо привабливу сферу пізнання: дитину можуть захоплювати незвичайний вигляд рослини, поведінка тварини, зміни погодних умов, перші весняні явища, осіннє забарвлення листя чи інші сезонні перетворення. Такі емоційно забарвлені враження мають важливе виховне значення, оскільки здатні поступово переходити від ситуативного захоплення конкретним природним об'єктом до усвідомлення його значущості та формування стійкішого позитивного ставлення до природи загалом.

Відповідні положення узгоджуються з результатами сучасних зарубіжних досліджень ефективності навчання, заснованого на безпосередній взаємодії дітей із природним середовищем. Систематичний огляд N. Miller, S. Kumar,

K. Pearce і K. Baldock засвідчує значний науковий інтерес до впливу природоорієнтованого навчання на розвиток дітей молодшого шкільного віку *(Miller N., Kumar S., Pearce K., Baldock K., 2021).*

Важливу роль у цьому процесі відіграє емпатія як здатність емоційно відгукуватися на стан іншої живої істоти, співпереживати їй та виявляти готовність до допомоги. Молодші школярі можуть виявляти здатність переносити власні переживання на світ живого, що створює сприятливі умови для розвитку гуманного ставлення до тварин і рослин. Наприклад, спостереження за птахами в холодну пору року, усвідомлення їхньої потреби в їжі, виявлення пошкодженої рослини або зустріч із твариною, яка потребує допомоги, можуть викликати у дитини співчуття та бажання діяти. Завдання педагога полягає в тому, щоб не залишати таку емоційну реакцію лише на рівні переживання, а спрямовувати її до конкретного, посильного вчинку. У такому випадку почуття набуває діяльнісного характеру й може ставати внутрішнім мотивом природоохоронної поведінки.

Віковою особливістю, яку необхідно враховувати під час організації екологічного виховання, є специфіка пізнавальної діяльності молодших школярів. На цьому етапі важливе місце у сприйманні та осмисленні інформації належить конкретним образам, наочності, безпосередньому досвіду та практичним діям. Через це надмірно абстрактне представлення складних екологічних проблем не завжди забезпечує належний виховний результат. Значно більший педагогічний потенціал мають ситуації, які дитина може безпосередньо побачити, дослідити та пережити: спостереження за природними об’єктами, нескладні досліди, екскурсії, практична робота, взаємодія з природними матеріалами, використання художніх образів, літературних творів та проблемних ситуацій.

Важливо, щоб екологічний зміст був максимально наближений до безпосереднього життєвого досвіду учня. Так, пояснюючи необхідність ощадливого використання води, доцільно не обмежуватися повідомленням

відповідного правила. Ефективнішим може бути спостереження за тим, скільки води використовується під час повсякденних справ, проведення простого досліду, аналіз конкретних випадків її марнотратного використання, обговорення можливих наслідків та виконання практичного завдання зі скорочення зайвих витрат води. За такого підходу екологічне знання перестає бути абстрактною інформацією: воно пов'язується з реальними діями дитини, набуває для неї особистісного сенсу та може впливати на її поведінку.

Необхідною передумовою формування позитивного ставлення до природи є також урахування потреби молодших школярів у позитивному емоційному підкріпленні, визнанні та переживанні власної успішності. Дитині важливо бачити, що її дії мають конкретний результат і можуть бути корисними для довкілля. Такі можливості створюють, наприклад, вирощування та догляд за рослинами, виготовлення й облаштування годівнички, допомога в упорядкуванні пришкільної території, створення екологічного плаката чи виконання іншого природоохоронного завдання. Усвідомлення результату власної діяльності сприяє виникненню почуття причетності, особистої значущості та відповідальності. Позитивний досвід участі в екологічно спрямованій діяльності, своєю чергою, створює передумови для закріплення відповідних моделей поведінки.

Важливою віковою передумовою є й прагнення молодших школярів до активної взаємодії з навколишнім світом. Дитина цього віку потребує не тільки пояснення чи спостереження, а й можливості діяти, досліджувати, експериментувати, ставити запитання та самостійно знаходити відповіді. Тому формування ставлення до природи доцільно організовувати через різноманітні види діяльності, у яких учень виступає активним учасником, а не лише пасивним споживачем готової інформації. Саме діяльнісний досвід сприяє глибшому засвоєнню екологічних норм і поступовому перетворенню їх на особистісно значущі орієнтири.

Водночас сприятливі вікові характеристики самі по собі не гарантують сформованості емоційно-ціннісного ставлення до природи. Емоційність може залишатися ситуативною, а інтерес до природних об'єктів – нестійким, якщо він не підкріплюється систематичним педагогічним впливом. Тому важливо забезпечити послідовне накопичення дитиною позитивного емоційного досвіду взаємодії з природою, поступове поглиблення її знань, залучення до практичної діяльності та осмислення результатів власних учинків.

Отже, вікові особливості учнів початкової школи – емоційна чутливість, відкритість до нового, допитливість, образність сприймання, здатність до емпатії, потреба в діяльності та позитивному підкріпленні – створюють сприятливе підґрунтя для формування емоційно-ціннісного ставлення до природи. Проте реалізація цього потенціалу потребує цілеспрямованої педагогічної роботи. Систематична взаємодія з природним довкіллям, органічне поєднання пізнавальної, емоційної та практичної діяльності, створення ситуацій особистої причетності й успіху дають змогу поступово перевести безпосередній інтерес дитини до природи у більш стійке ціннісне ставлення та готовність відповідально діяти задля її збереження.

Зміст і засоби екологічного виховання молодших школярів. Результативність формування емоційно-ціннісного ставлення учнів до природи значною мірою визначається характером досвіду, який вони набувають у процесі безпосередньої та опосередкованої взаємодії з природним довкіллям. Тому екологічний зміст початкової освіти доцільно реалізовувати не як сукупність ізольованих тем або окремих виховних заходів, а як наскрізний компонент освітньої діяльності. Його зміст може природно інтегруватися в навчання, дослідницьку роботу, спілкування, творчість, практичну діяльність та повсякденну поведінку учнів.

Одним із провідних засобів екологічного виховання є систематичне спостереження за природою. Регулярне ознайомлення зі змінами погодних умов, сезонними явищами, особливостями розвитку рослин, поведінкою тварин

та іншими проявами природного середовища сприяє формуванню в дітей уміння помічати взаємозв'язки й закономірності довкілля. Водночас спостереження створює умови для виникнення емоційного відгуку на побачене, розвитку допитливості та зацікавленості природним світом. Важливо, щоб така діяльність мала не епізодичний, а систематичний характер: одноразове спостереження дає дитині окреме враження, тоді як регулярне повернення до одного й того самого об'єкта або явища дозволяє накопичувати особистий досвід, порівнювати зміни та робити самостійні висновки.

Вагомі можливості для екологічного виховання створюють екскурсії, прогулянки та інші форми безпосереднього контакту з природним середовищем. Перебування за межами класної кімнати розширює сенсорний і пізнавальний досвід школярів: вони можуть безпосередньо бачити, чути, відчувати та порівнювати природні об'єкти, спостерігати за їхніми особливостями, ставити запитання й самостійно виявляти цікаві явища. За такої організації діяльності педагог перестає бути виключно транслятором готової інформації, натомість виконує роль організатора пізнавального пошуку, спрямовує увагу дітей, стимулює постановку запитань і допомагає осмислити результати власних спостережень.

Значущість навчання поза межами класної кімнати підтверджується і сучасними зарубіжними дослідженнями. Систематичний огляд J. Mann та співавторів засвідчує різноманітні можливості природоорієнтованого навчання для розвитку й навчальних результатів школярів, підкреслюючи цінність безпосередньої взаємодії дітей із природним середовищем *(Mann J., Gray T., Truong S., Brymer E., Passy R., Ho S., Sahlberg P., Ward K., Bentsen P., Curry C., Cowper R., 2022)*.

Особливе місце в системі екологічного виховання належить навчально-дослідницькій діяльності, яка дає змогу активізувати пізнавальну самостійність учнів. Проведення доступних для віку дослідів, виконання мініпроєктів, організація простих експериментів, дослідницьких спостережень та пошукових

завдань спонукають дитину не лише сприймати готові пояснення, а й самостійно встановлювати певні залежності та перевіряти власні припущення. У процесі такої роботи розвиваються допитливість, ініціативність, уміння аналізувати результати власної діяльності та відповідально ставитися до виконання поставленого завдання. Важливо й те, що дослідження природи може супроводжуватися емоційним переживанням відкриття, що посилює особистісну значущість отриманого досвіду.

Ефективним засобом переходу від екологічних знань і ціннісних суджень до реальної поведінки є природоохоронна та практична діяльність. Догляд за кімнатними рослинами, вирощування й висаджування рослин, виготовлення та поповнення годівничок для птахів, упорядкування шкільного подвір'я, участь у прибиранні природних територій, сортування відходів та інші посильні для дітей справи дають можливість безпосередньо реалізувати екологічні цінності у конкретних вчинках. У такій діяльності дитина бачить практичний результат власних зусиль і поступово усвідомлює, що її поведінка може впливати на стан навколишнього середовища. Саме тому практична природоохоронна робота має розглядатися не лише як спосіб закріплення знань, а й як важливий механізм формування відповідальності та особистої причетності до збереження природи.

Значний виховний ресурс містять мистецтво та художньо-творча діяльність. Літературні твори, поезія, казки, музичні композиції, живопис, фотографія, образотворча та інша дитяча творчість сприяють емоційному осмисленню природного світу. За допомогою художніх образів дитина отримує можливість побачити природу не лише як сукупність об'єктів, які необхідно вивчати, а як цілісний живий світ, здатний викликати почуття захоплення, радості, співпереживання та турботи. Особливо цінними є твори, які допомагають учням осмислити наслідки людського втручання в природу та підводять їх до морального оцінювання власної поведінки.

Потенціал мистецької діяльності у формуванні зв'язку дитини з природою знаходить підтвердження і в зарубіжних дослідженнях.

Систематичний огляд Z. Moula, K. Palmer та N. Walshe засвідчує, що мистецькі практики, реалізовані в природному або відкритому середовищі, можуть бути пов'язані з розвитком зв'язку з природою, а також із позитивними аспектами емоційного та психологічного благополуччя дітей і молоді *(Moula Z., Palmer K., Walshe N., 2022).*

Важливим компонентом змісту екологічного виховання є українська народна творчість. Прислів'я та приказки, загадки, легенди, народні прикмети й інші фольклорні жанри містять значний пласт уявлень про взаємозв'язок людини з природним довкіллям. Звернення до таких матеріалів дає змогу ознайомити дітей із традиційним ставленням українського народу до землі, води, рослин і тварин, а також показати, що дбайливе ставлення до природи має глибоке культурне та моральне підґрунтя. Водночас доцільно спонукати школярів порівнювати традиційні уявлення із сучасними екологічними проблемами та цінностями, що сприяє їхньому осмисленню в сучасному контексті.

Екологічний зміст може ефективно реалізовуватися також через ігрову, проблемно-пошукову та творчу діяльність. Екологічні ситуації, рольові та дидактичні ігри, завдання на вибір способу дії, моделювання життєвих ситуацій дають змогу в доступній для молодшого школяра формі розглядати різні варіанти поведінки людини в природі. Обговорення запитань на кшталт «Що станеться, якщо…?», «Як можна допомогти?», «Який учинок буде правильним?», «Що залежить від мене?» сприяє розвитку здатності оцінювати власні дії та прогнозувати їхні наслідки. Таким чином, екологічне виховання набуває практико-орієнтованого характеру, а дитина отримує можливість не лише засвоювати правила, а й застосовувати їх у змодельованих ситуаціях.

Отже, зміст і засоби екологічного виховання молодших школярів мають бути різноманітними, взаємопов'язаними та зорієнтованими на особистісний досвід дитини. Спостереження, екскурсії, дослідницька й проєктна діяльність, природоохоронна практична діяльність, мистецтво, художнє слово, фольклор,

ігрові та проблемно-пошукові завдання створюють різні можливості для пізнання природи, емоційного переживання її цінності та практичної взаємодії з нею. Їхня педагогічна ефективність зростає за умови систематичного та цілеспрямованого використання.

Таким чином, провідним орієнтиром добору засобів екологічного виховання має бути їхня здатність забезпечувати взаємозв'язок пізнавального, емоційно-ціннісного та діяльнісного досвіду учня. Лише за умови такого поєднання інформація про природу набуває особистісного значення, емоційне переживання переходить у ціннісне усвідомлення, а сформовані цінності отримують практичне вираження у поведінці. Саме це створює підґрунтя для переходу від ситуативної зацікавленості природою до стійкого, усвідомленого й відповідального ставлення до неї.

Педагогічні умови формування емоційно-ціннісного ставлення до природи. Реалізація завдань екологічного виховання в умовах Нової української школи передбачає цілеспрямоване, системне та педагогічно виважене проєктування освітнього процесу. У цьому контексті педагогічні умови доцільно трактувати як сукупність спеціально створених змістових, організаційних, методичних і виховних обставин та чинників, що забезпечують сприятливе середовище для формування в молодших школярів позитивного, усвідомленого, емоційно насиченого й відповідального ставлення до природи. Їхня ефективність визначається не ізольованим застосуванням окремих заходів, а взаємодією та взаємодоповненням усіх складників освітнього процесу.

Аналіз наукових праць дослідників, присвячених проблемам екологічного виховання, формування ціннісного ставлення до природи та обґрунтування відповідних педагогічних умов, дає підстави визначити комплекс взаємопов'язаних педагогічних умов, реалізація яких сприяє результативному формуванню емоційно-ціннісного ставлення молодших школярів до природи *(Жирська Г., 2014; Магрламова К., 2008; Мозуль І., 2025; Плохій З., 2004; Шевчук К., Тирон О., 2021).*

1. Орієнтація екологічного виховання на особистість дитини.

Першою педагогічною умовою визначаємо спрямування екологічного виховання на особистість дитини та врахування її індивідуальних освітніх і психологічних особливостей. Такий підхід ґрунтується на розумінні учня не як пасивного адресата педагогічного впливу, а як активного суб'єкта освітньої діяльності, який має власні інтереси, потреби, емоційні реакції, життєвий досвід, пізнавальні можливості та індивідуальний темп розвитку.

Особливого значення в цьому процесі набувають вікові характеристики молодших школярів. Емоційна чутливість, безпосередність, допитливість, потреба в пізнанні навколишнього світу, схильність до наслідування позитивних моделей поведінки та орієнтація на особистий досвід створюють сприятливі передумови для екологічного виховання. Завдання педагога полягає в тому, щоб використати ці вікові ресурси для створення ситуацій, у яких дитина не лише засвоює інформацію про необхідність охорони природи, а й особисто переживає значущість взаємодії з нею та відповідальності за її збереження.

Наприклад, під час спостереження за кімнатною рослиною учитель може запропонувати учням визначити умови, необхідні для її росту й розвитку, а згодом організувати систематичний догляд за нею. У такому випадку відбувається поступовий перехід від формального засвоєння знання «рослині потрібна вода» до набуття особистісно значущого досвіду: «від моїх дій залежить стан живого організму». Саме така зміна позиції – від спостерігача до відповідального учасника – створює підґрунтя для формування ціннісного ставлення до природи.

Важливим компонентом особистісно орієнтованої організації екологічного виховання є також надання дитині можливості здійснювати вибір. Учням можна пропонувати самостійно визначати тему або об'єкт мініпроєкту, спосіб представлення результатів, вид творчого завдання, напрям спостереження чи форму участі у природоохоронній діяльності. Можливість

вибору підвищує суб'єктність школяра, посилює відчуття власної причетності до діяльності та сприяє переходу від зовнішньої мотивації до внутрішнього прийняття екологічних цінностей.

Орієнтація на особистість дитини передбачає й диференціацію педагогічних впливів. Молодші школярі відрізняються характером емоційного реагування на природні об'єкти, рівнем сформованості екологічних уявлень, готовністю до практичної діяльності, комунікативними можливостями та здатністю вербалізувати власні почуття. Відтак учитель має забезпечувати різноманітність способів залучення дітей до екологічної діяльності, створюючи умови, за яких кожен учень може виявити себе та набути позитивного досвіду взаємодії з природою.

2. Наскрізне інтегрування екологічної проблематики в освітній процес.

Другою педагогічною умовою є систематична інтеграція екологічного змісту в різні складники освітнього процесу та освітні галузі. В умовах Нової української школи екологічне виховання не має обмежуватися лише природничою тематикою або окремими заняттями інтегрованого курсу «Я досліджую світ». Формування емоційно-ціннісного ставлення до природи потребує постійного звернення до природоохоронної проблематики в різних видах навчальної та позанавчальної діяльності.

Екологічний зміст може органічно поєднуватися з матеріалом мовно-літературної, математичної, мистецької, технологічної та інших освітніх галузей. Такий підхід забезпечує можливість розглядати природні явища й екологічні проблеми з різних позицій, установлювати міжпредметні зв'язки та поступово формувати в дітей цілісне уявлення про взаємозалежність людини й природного навколишнього середовища.

У межах мовно-літературної освітньої галузі доцільним є використання художніх і пізнавальних текстів природничої та екологічної тематики, аналіз поведінки персонажів, обговорення їхніх учинків і мотивів, розгляд морально-етичних ситуацій, пов'язаних зі ставленням людини до природи. Створення

власних усних і письмових висловлювань, описів природних об'єктів, екологічних казок чи коротких повідомлень дає змогу поєднувати розвиток мовлення з формуванням особистісного ставлення до природного світу. При цьому художній текст може виконувати не лише інформаційну, а й емоційно-виховну функцію, спонукаючи дитину співпереживати, оцінювати ситуацію та співвідносити її зі своїм досвідом.

Значні можливості для емоційного освоєння природи створює мистецька освітня галузь. Зображення пейзажу, рослин і тварин, створення композицій із природних матеріалів, сприймання музичних творів, пов'язаних із природою, інсценізація казок, виготовлення екологічних плакатів чи тематичних композицій сприяють формуванню естетичного образу природи та емоційного відгуку на її красу. Творча діяльність водночас дає дитині можливість виразити власне бачення природного світу та переживання, пов'язані з ним.

Екологічний контекст може бути змістовно представлений і в математичній освітній галузі. Учні можуть опрацьовувати дані про споживання води, кількість зібраних або відсортованих відходів, результати спостережень за температурою повітря, кількістю опадів, змінами тривалості дня тощо. Побудова таблиць, діаграм, виконання обчислень та аналіз отриманих результатів дають змогу продемонструвати практичну цінність математичних знань і водночас звернути увагу дітей на реальні екологічні процеси.

Таким чином, інтегроване навчання сприяє подоланню фрагментарності у сприйманні екологічної інформації та допомагає дитині усвідомити, що природа є цілісною системою, а взаємодія людини з нею охоплює різні сфери життя. Екологічна проблематика при цьому постає не як вузька тема окремого навчального предмета, а як наскрізний ціннісний контекст освітнього процесу.

3. Формування емоційно сприятливого природничого освітнього середовища.

Третьою умовою вважаємо створення такого природничого освітнього середовища, яке стимулює позитивні емоційні переживання, пізнавальний

інтерес, естетичне сприймання та готовність дитини до безпосередньої взаємодії з природою. Для формування емоційно-ціннісного ставлення важливо, щоб природне довкілля входило в життєвий і навчальний досвід дитини не лише як об'єкт вивчення, а і як простір позитивних переживань, відкриттів та особистісного самовираження.

З огляду на те, що молодші школярі значною мірою сприймають навколишній світ через конкретні образи й емоційні враження, доцільним є використання художнього слова, казкових сюжетів, музики, ілюстрацій, природних матеріалів, дитячої творчості. Екологічна казка може допомогти учневі усвідомити проблему забруднення довкілля через зрозумілий і емоційно близький образ, тоді як рольова гра створює можливість уявити себе на місці тварини, рослини або людини, яка має прийняти рішення щодо використання природного ресурсу. Така зміна позиції сприяє розвитку емпатії та морального осмислення взаємин людини з природою.

Водночас емоційно сприятливе природниче середовище не варто зводити лише до відповідного оформлення класної кімнати. Значно важливішою є організація систематичного безпосереднього контакту дитини з природою. Регулярні прогулянки, сезонні спостереження, короткотривалі дослідження на території закладу освіти, екскурсії, практичні заняття та заняття на відкритому повітрі створюють можливості для безпосереднього сприймання природних явищ і накопичення особистого досвіду.

Доцільним є облаштування в класі природничого осередку, до організації якого залучаються самі діти. Учні можуть доглядати за кімнатними рослинами, вести календар спостережень за природою, збирати безпечний природний матеріал для дослідницької та творчої роботи, створювати тематичні виставки, фіксувати результати власних спостережень у малюнках, схемах чи коротких записах. Участь у створенні такого середовища посилює особисту причетність школярів і формує відповідальне ставлення до спільного простору.

Систематичне накопичення позитивних емоційних вражень від взаємодії з природою має особливе значення для становлення ціннісної сфери особистості. Радість від самостійного відкриття, захоплення красою природного об'єкта, задоволення від результату власної праці, співпереживання живій істоті чи усвідомлення користі власної допомоги поступово можуть переходити від ситуативних емоційних реакцій до стійких особистісних установок. Відтак емоційний досвід стає одним із механізмів перетворення природничих знань на особистісно прийняті цінності.

4. Залучення школярів до практичної та пошуково-дослідницької діяльності.

Наступною педагогічною умовою є систематичне включення молодших школярів у практичну, пошукову та дослідницьку діяльність, безпосередньо пов'язану з пізнанням, збереженням і охороною природи. Саме діяльнісний досвід створює можливість перевести набуті знання та емоційні переживання у конкретні способи поведінки, а екологічні переконання – у реальні вчинки.

До ефективних форм такої діяльності належать догляд за кімнатними рослинами, облаштування клумб і куточків природи, висаджування та догляд за рослинами, підгодівля птахів у зимовий період, виготовлення годівничок, підтримання чистоти на території закладу освіти, сортування відходів, участь в інших доступних природоохоронних ініціативах. Важливо, щоб кожна з таких справ мала для дитини зрозумілу мету та була пов'язана з усвідомленням її реального результату.

Принципово важливо уникати формального характеру природоохоронної діяльності. Учень має розуміти не лише що він робить, а й для чого, кому або чому це потрібно та які наслідки може мати його дія. Наприклад, виготовлення годівнички доцільно продовжити систематичними спостереженнями за птахами: визначати їхні види, фіксувати частоту появи, особливості поведінки, види корму, за яким вони прилітають. У результаті окрема практична дія перетворюється на тривалий пізнавально-дослідницький процес.

Дослідницький компонент може реалізовуватися через доступні віку дітей експерименти, мініпроєкти, спостереження та нескладні дослідницькі завдання. Учні можуть з'ясовувати умови, необхідні для росту рослин, досліджувати властивості води, спостерігати за сезонними змінами природних об'єктів, порівнювати стан живих організмів за різних умов середовища, встановлювати прості причинно-наслідкові зв'язки між діяльністю людини та змінами в природі.

Особливу педагогічну цінність у цьому контексті мають заняття на відкритому повітрі, оскільки вони забезпечують природне поєднання пізнавальної, дослідницької, емоційної та практичної діяльності. Безпосередній контакт із природним середовищем робить навчальну інформацію конкретною, доступною для сприймання та особистісно значущою. Дитина не просто отримує відомості про природний об'єкт, а спостерігає його, досліджує, емоційно реагує на нього та вчиться діяти відповідно до усвідомленої цінності.

5. Застосування діяльнісних, інтерактивних і дослідницьких методів.

Важливою умовою формування емоційно-ціннісного ставлення до природи є зміна характеру екологічного виховання – від переважно репродуктивного засвоєння готових знань до активної взаємодії, пошуку, обговорення, дослідження та самостійного прийняття рішень. Екологічна поведінка не формується лише шляхом повідомлення дитині правил природоохоронної діяльності; вона потребує практичного проживання відповідних ситуацій і набуття власного досвіду їх осмислення.

У зв'язку з цим доцільним є використання проблемних ситуацій, екологічних квестів, рольових і дидактичних ігор, дослідницьких завдань, проєктної діяльності, дискусій, елементів моделювання, творчих майстерень, парної та групової роботи. Різноманітність методів дає змогу залучати дітей до екологічної проблематики через різні види активності та враховувати їхні індивідуальні особливості.

Проблемні ситуації спрямовують учня на пошук відповіді, допомагають виявити суперечність між різними способами дії та оцінити можливі наслідки власного рішення. Наприклад, дітям можна запропонувати обговорити ситуації: «Чи можна залишити сміття після пікніка, якщо його ніхто не побачить?», «Чи потрібно рятувати дерево, якщо воно росте на території, яку планують забудувати?», «Що може статися з птахами, якщо взимку вони не отримуватимуть додаткового корму?». Подібні завдання спонукають школярів не просто відтворювати готове правило, а аналізувати конкретні обставини, співвідносити можливі дії з їхніми наслідками та здійснювати моральний вибір.

Екологічні проєкти мають особливу цінність завдяки можливості об'єднати тривале спостереження, пошук і опрацювання інформації, практичну діяльність та представлення отриманих результатів. У процесі проєктної роботи дитина бачить зв'язок між власними діями та конкретним результатом, набуває досвіду співпраці, розподілу відповідальності та презентації спільного доробку. Це посилює відчуття власної спроможності впливати на навколишній світ.

Інтерактивні методи водночас створюють умови для розвитку критичного мислення та відповідальної позиції. Учень поступово вчиться не лише погоджуватися з готовими твердженнями про необхідність охорони природи, а й аргументувати власну думку, порівнювати різні позиції, оцінювати наслідки альтернативних рішень, прогнозувати результати певних дій і обґрунтовувати власний вибір. Саме така активна позиція є важливою передумовою переходу від зовнішньо заданих норм до внутрішньо прийнятих ціннісних орієнтацій.

6. Взаємодія закладу освіти, родини та громади.

Формування екологічних цінностей і емоційно-ціннісного ставлення до природи не може бути достатньо результативним, якщо цей процес обмежується межами шкільного середовища. Поведінкові моделі, які дитина спостерігає в повсякденному житті, можуть впливати на становлення її ставлення до довкілля. Молодший школяр не лише слухає пояснення дорослих,

а й спостерігає за їхніми реальними вчинками, засвоюючи прийняті в найближчому соціальному оточенні способи поведінки.

Тому однією з необхідних умов є узгодження екологічно орієнтованих дій закладу освіти та родини. Педагог може залучати батьків і дітей до виконання спільних завдань: спостережень за природою, вирощування та висаджування рослин, виготовлення годівничок, організації природоохоронних акцій, прибирання доступних природних територій, сортування побутових відходів тощо. Такі форми роботи забезпечують перенесення екологічних норм із навчальної ситуації у повсякденне життя.

Особливе значення має особистий приклад дорослих. Якщо дитина систематично спостерігає, що члени родини та педагоги не залишають сміття в природі, раціонально використовують воду, дбайливо ставляться до рослин і тварин, бережуть природні ресурси, вона може поступово сприймати відповідну поведінку як звичну та соціально прийнятну норму. Отже, узгодженість вимог і поведінкових моделей дорослих створює умови для закріплення екологічних установок дитини.

Водночас доцільним є розширення партнерської взаємодії за межі закладу освіти та родини. Співпраця з місцевою громадою, природоохоронними організаціями, еколого-натуралістичними центрами, закладами культури, громадськими об’єднаннями та іншими установами може істотно урізноманітнити форми практичної діяльності школярів. Участь у спільних природоохоронних ініціативах дає дітям змогу побачити, що турбота про довкілля є не лише індивідуальною справою, а й важливою сферою спільної відповідальності.

Таким чином, партнерство закладу освіти, родини та громади сприяє виходу екологічного виховання за межі суто навчального процесу. Воно створює умови для включення дитини в реальні практики взаємодії з природою та суспільством, унаслідок чого екологічні знання, емоційні переживання й ціннісні орієнтації набувають практичного втілення. Саме в такій взаємодії

поступово формується готовність школяра діяти відповідально щодо природи не лише в межах навчальної ситуації, а й у повсякденному житті.

Від педагогічних умов до системи екологічних цінностей. Реалізація визначених педагогічних умов має бути зорієнтована не лише на набуття учнями певного обсягу екологічних знань чи засвоєння правил природоохоронної поведінки, а передусім на досягнення особистісного результату – формування системи екологічних цінностей, яка визначатиме характер ставлення дитини до природи та спрямовуватиме її реальну поведінку. Саме тому ефективність екологічного виховання доцільно оцінювати не тільки за тим, наскільки добре учень знає правила взаємодії з довкіллям, а й за мірою їх особистісного прийняття та готовністю дотримуватися відповідних норм у повсякденному житті.

У цьому процесі відбувається поступовий перехід від зовнішньої регуляції поведінки до внутрішньої саморегуляції. На початкових етапах дитина може виконувати природоохоронні вимоги тому, що цього очікує вчитель або інший дорослий: не ламати гілки, не залишати сміття, не руйнувати мурашники, не ображати тварин, економно використовувати воду. Проте стійке емоційно-ціннісне ставлення формується тоді, коли ці вимоги перестають сприйматися як сукупність зовнішніх заборон і поступово перетворюються на особистісно прийняті переконання та способи поведінки. Отже, педагогічне завдання полягає не лише в тому, щоб сформулювати для дитини правило, а й у тому, щоб створити умови для його емоційного переживання, осмислення та практичного застосування.

Важливо, щоб молодший школяр поступово усвідомив багатовимірну цінність природи. Вона не є виключно джерелом ресурсів, необхідних для задоволення потреб людини. Природа є фундаментальною умовою існування життя, середовищем життєдіяльності людини та інших живих організмів, джерелом пізнання, естетичних переживань, емоційного благополуччя й духовного розвитку. Таке розуміння сприяє подоланню суто споживацького

сприймання природного довкілля та формуванню ставлення до нього як до самостійної цінності.

Взаємозв'язок екологічних цінностей і пізнавального компонента екологічної освіти простежується й у зарубіжних дослідженнях. Зокрема, J. Schneiderhan-Opel та F. X. Bogner досліджували взаємозв'язок екологічних цінностей та знань учнів початкової школи у контексті вивчення проблематики водних ресурсів, що дає підстави розглядати ціннісне ставлення та екологічне знання як взаємопов'язані складники освітнього процесу *(Schneiderhan-Opel J., Bogner F. X., 2021)*.

У процесі освітньої діяльності необхідно поступово підводити дитину до усвідомлення взаємозв'язку між власними вчинками та станом навколишнього середовища. Навіть дія, яка здається незначною, може мати певні наслідки: залишене після відпочинку сміття забруднює територію, зламана гілка пошкоджує рослину, зруйноване пташине гніздо створює загрозу для потомства, бездумне використання води призводить до її марного витрачання. Водночас важливо допомогти учневі побачити й зворотний зв'язок – позитивний результат власної діяльності. Посаджена й доглянута рослина росте, встановлена годівничка забезпечує птахів кормом, прибрана територія стає чистішою, а заощаджена вода чи електроенергія свідчить про відповідальне використання ресурсів.

Саме тому екологічне виховання не повинно будуватися переважно на системі заборон, покарань або формуванні почуття провини за завдану природі шкоду. Надмірна орієнтація на негативні наслідки може спричиняти негативні емоційні реакції та не створювати в дитини відчуття власної спроможності впливати на ситуацію. Значно продуктивнішим є підхід, за якого поряд з усвідомленням екологічних проблем дитині демонструється можливість позитивної особистої дії. Учень має не лише знати, чого не можна робити, а й розуміти, що саме він може зробити для поліпшення стану довкілля.

У цьому контексті особливої цінності набувають доступні віку школярів практичні справи: посадити та доглянути рослину, допомогти тварині, виготовити годівничку, прибрати територію, повторно використати матеріал, відсортувати відходи, економно використовувати воду й електроенергію, долучитися до природоохоронної ініціативи. Такі дії мають не лише безпосередній природоохоронний результат, а й важливий виховний ефект: вони демонструють дитині реальність її власного впливу на навколишній світ.

Особливого значення набуває переживання школярем суб'єктності та власної спроможності. Коли дитина бачить конкретний результат своєї діяльності, у неї може формуватися переконання: «Я можу щось зробити для природи», «від моїх дій залежить стан живого організму», «я можу допомогти». Таке відчуття особистої причетності поступово зміцнює внутрішню мотивацію та сприяє переходу від ситуативної участі в екологічних заходах до більш стійкої готовності діяти відповідально.

Водночас формування екологічних цінностей передбачає не тільки індивідуальний досвід, а й можливість його обговорення та осмислення. Після практичної діяльності доцільно організовувати короткі рефлексивні бесіди: що дитина відчувала, виконуючи завдання; що змінилося завдяки її діям; чому важливо було допомогти живому організму; що вона могла б зробити в подібній ситуації в майбутньому. Така рефлексія допомагає перевести безпосередній досвід у площину усвідомлених ціннісних суджень.

Відтак формування системи екологічних цінностей можна розглядати як поступовий процес переходу від знання – до емоційного переживання, від переживання – до усвідомлення цінності, від усвідомлення – до особистісного прийняття, а від нього – до відповідальної практичної дії. Саме за такої логіки педагогічні умови перестають бути лише організаційними засобами освітнього процесу і стають важливим механізмом особистісного розвитку дитини.

Отже, результатом екологічного виховання в початковій школі має бути не просто «екологічно грамотна» дитина, яка знає правила поведінки в природі, а

емоційно чутлива, ціннісно зорієнтована та діяльнісно відповідальна особистість, для якої бережливе ставлення до природи поступово стає внутрішньою нормою поведінки. Такий результат відповідає сутності емоційно-ціннісного ставлення до природи та створює підґрунтя для його подальшого розвитку.

Критерії та прояви сформованого ставлення до природи. Сформованість емоційно-ціннісного ставлення до природи доцільно визначати не за окремою ознакою, а за сукупністю взаємопов'язаних критеріїв і поведінкових проявів, які відображають єдність емоційної, когнітивної, ціннісно-мотиваційної та діяльнісної сфер особистості молодшого школяра. Важливо враховувати не лише те, що дитина знає про природу, а й те, як вона її сприймає, які почуття виявляє, наскільки усвідомлює її цінність і як ці уявлення реалізуються в реальній поведінці.

Передусім показником сформованості такого ставлення є емоційна чутливість до природи. Вона виявляється у здатності дитини помічати зміни у стані природних об'єктів, емоційно реагувати на красу природного довкілля, виявляти співпереживання живим організмам, радіти позитивним змінам та відчувати занепокоєння у випадках заподіяння природі шкоди. Емоційна чутливість передбачає також здатність дитини не залишатися байдужою до стану рослин, тварин і природного середовища загалом. Наприклад, школяр може помітити, що рослина потребує вологи, що птах узимку потребує корму, або що засмічена територія негативно впливає на її стан і вигляд. Такі реакції свідчать про те, що природа поступово набуває для дитини особистісної емоційної значущості.

Другим критерієм є ціннісне усвідомлення природи. Йдеться про сформованість уявлень про природу як про цінність, яка не зводиться виключно до її корисності для людини. Дитина має поступово усвідомлювати взаємозалежність людини і природного довкілля, значення природних компонентів для підтримання життя, а також цінність існування інших живих

організмів. Важливим проявом цього критерію є розуміння того, що збереження природи є не лише вимогою дорослих чи правилом поведінки, а спільною відповідальністю кожної людини. Водночас ціннісне усвідомлення передбачає здатність пояснити, чому необхідно берегти природні ресурси, дбати про живі організми та відповідально ставитися до довкілля.

Тісно пов'язаним із ціннісним усвідомленням є мотиваційно-ціннісний критерій, який характеризує внутрішні мотиви екологічно доцільної поведінки. Важливо, щоб дитина виконувала природоохоронні дії не лише через контроль учителя або страх покарання, а й тому, що сама вважає їх правильними та необхідними. Поступове формування внутрішньої мотивації виявляється у добровільному прагненні допомагати живим організмам, підтримувати чистоту довкілля, економно використовувати природні ресурси, брати участь у природоохоронних справах. Саме перехід від зовнішньої вимоги до внутрішньої потреби діяти відповідально є одним із суттєвих проявів сформованості емоційно-ціннісного ставлення.

Поведінкова готовність до відповідальної взаємодії з природою є важливим проявом сформованого ставлення. Воно має знаходити конкретне практичне втілення, оскільки самі слова про любов до природи ще не свідчать про сформованість відповідної ціннісної орієнтації. Поведінкова готовність виявляється у дотриманні правил поведінки в природному середовищі, дбайливому ставленні до рослин і тварин, ощадливому використанні води, електроенергії та інших ресурсів, недопущенні забруднення довкілля, участі у доступних природоохоронних заходах. Важливо також, щоб дитина була готовою переносити набуті в школі правила у повсякденні ситуації – під час прогулянки, відпочинку на природі, перебування вдома чи взаємодії з іншими людьми.

Важливою ознакою сформованості ставлення до природи є відповідальність за наслідки власної діяльності. У молодшому шкільному віці дитина поступово оволодіває здатністю встановлювати причинно-наслідкові

зв’язки між власними діями та змінами у природному середовищі. Учень має усвідомлювати, що конкретні вчинки можуть мати як позитивні, так і негативні наслідки. Зламана гілка, зруйноване гніздо, залишене сміття, марне витрачання води або пошкодження рослини впливають на стан довкілля. Водночас посаджена рослина, догляд за твариною, прибирання території чи повторне використання матеріалів демонструють можливість позитивного впливу людини на природу.

Ще одним важливим проявом є критичне ставлення до споживацької моделі взаємодії з природою. Його формування передбачає поступове усвідомлення дитиною того, що природні ресурси не є безмежними, а використання природних благ потребує відповідальності та врахування можливих наслідків. Молодший школяр має починати розрізняти потребу і надмірне споживання, замислюватися над доцільністю використання води, паперу, електроенергії та інших ресурсів, розуміти значення повторного використання речей і сортування відходів. Важливо, щоб таке усвідомлення не залишалося абстрактним знанням, а поступово впливало на повсякденний вибір дитини.

Окремим проявом сформованого ставлення можна вважати готовність до самостійної екологічно доцільної діяльності та ініціативність. Якщо дитина сама звертає увагу на проблему, пропонує спосіб її розв’язання, добровільно долучається до природоохоронної справи або спонукає інших до відповідальної поведінки, це може свідчити про глибше особистісне прийняття екологічних цінностей. Наприклад, учень може самостійно запропонувати прибрати сміття після спільної діяльності, нагадати про необхідність економного використання води або ініціювати догляд за рослиною. У таких випадках екологічна норма вже значною мірою функціонує як внутрішній регулятор поведінки.

Доцільно також враховувати рефлексивний компонент сформованого ставлення. Дитина поступово має навчатися оцінювати власні вчинки щодо природи, пояснювати причини свого вибору, аналізувати наслідки поведінки та

визначати, як можна діяти інакше. Здатність поставити собі запитання «Чи правильно я вчинив?», «Чи не завдав я шкоди природі?», «Що я можу зробити, щоб виправити ситуацію?» є важливою передумовою становлення відповідальної поведінки.

Отже, теоретично визначені критерії та прояви сформованості емоційно-ціннісного ставлення до природи доцільно розглядати у взаємозв'язку: емоційна чутливість – ціннісне усвідомлення – внутрішня мотивація – відповідальна поведінка – рефлексія та готовність до самостійної екологічно доцільної діяльності. Жоден із цих проявів не є достатнім сам по собі. Наприклад, дитина може добре знати правила поведінки в природі, але не дотримуватися їх на практиці; може захоплюватися красою природи, проте не усвідомлювати власної відповідальності за її збереження. Тому сформованість ставлення визначається саме узгодженістю почуттів, знань, цінностей, мотивів, переконань і реальних учинків.

Таким чином, сформоване емоційно-ціннісне ставлення до природи в молодшого школяра виявляється тоді, коли природа стає для нього не лише об'єктом пізнання чи джерелом позитивних вражень, а особистісно значущою цінністю, що впливає на його вибір, поведінку та взаємодію з навколишнім світом. Саме така єдність емоційного переживання, ціннісного осмислення та практичної відповідальності може розглядатися як важливий результат реалізації визначених педагогічних умов у початковій школі.

Висновки. Проведений теоретичний аналіз дає підстави розглядати формування емоційно-ціннісного ставлення до природи як один із важливих напрямів екологічного виховання молодших школярів та водночас як необхідну складову розвитку їхньої екологічної компетентності в умовах Нової української школи. Такий підхід передбачає вихід за межі суто інформаційного засвоєння природничих знань і орієнтацію на особистісне прийняття дитиною екологічних цінностей, їх емоційне переживання та практичне втілення у взаємодії з природним довкіллям.

З’ясовано, що емоційно-ціннісне ставлення до природи має інтегративний характер і формується в результаті взаємодії когнітивного, емоційного, ціннісного та діяльнісного компонентів. Його сформованість виявляється не лише в обсязі природничих та екологічних знань, а й у здатності дитини емоційно реагувати на природні явища та стан живих організмів, усвідомлювати цінність природи, виявляти емпатію й турботу, оцінювати наслідки власних дій і виявляти готовність до відповідальної та екологічно доцільної поведінки.

Обґрунтовано, що молодший шкільний вік має значний потенціал для формування такого ставлення. Емоційна чутливість, допитливість, образність сприймання, безпосередній інтерес до навколишнього світу, здатність до співпереживання, потреба в діяльності та накопиченні власного досвіду створюють сприятливі передумови для емоційного й ціннісного освоєння природи. Водночас реалізація зазначеного потенціалу потребує систематичного педагогічного супроводу, цілеспрямованого створення відповідного освітнього середовища та залучення учнів до різноманітних форм безпосередньої взаємодії з природою.

У результаті узагальнення психолого-педагогічних і методичних досліджень визначено комплекс взаємопов’язаних педагогічних умов формування емоційно-ціннісного ставлення до природи: особистісну орієнтацію екологічного виховання; наскрізне інтегрування природоохоронної проблематики в різні освітні галузі; створення емоційно сприятливого природничого освітнього середовища; систематичне залучення дітей до практичної, пошукової та дослідницької природоохоронної діяльності; застосування діяльнісних, інтерактивних і дослідницьких методів; забезпечення партнерської взаємодії закладу освіти, родини та громади.

Обґрунтовано, що результативність визначених педагогічних умов залежить не стільки від використання окремого методу, форми чи педагогічного прийому, скільки від їх системного та взаємопов’язаного

застосування. Екологічні знання мають поєднуватися з безпосереднім досвідом взаємодії з природою, позитивними емоційними переживаннями, можливістю самостійного вибору, практичною діяльністю, обговоренням її результатів та рефлексією. Така організація освітнього процесу створює передумови для поступового переходу від зовнішнього засвоєння екологічних норм до їх особистісного прийняття та внутрішньої готовності діяти відповідально.

Важливим результатом реалізації визначених педагогічних умов має бути формування в дитини внутрішньої системи екологічних цінностей. Екологічно доцільна поведінка в цьому випадку виступає не лише результатом виконання вимог учителя чи дорослих, а наслідком усвідомлення цінності природи, емоційного ставлення до неї та розуміння власної відповідальності. Відтак сформованість емоційно-ціннісного ставлення до природи доцільно розглядати як єдність почуттів, знань, ціннісних орієнтацій, мотивів, переконань і реальних учинків.

Таким чином, формування емоційно-ціннісного ставлення до природи в початковій школі є цілісним, тривалим, послідовним та особистісно орієнтованим процесом, результативність якого забезпечується взаємодією змістових, організаційних, методичних і виховних чинників. Його результатом має стати не лише екологічно обізнаний учень, який знає правила поведінки в природі, а особистість, для якої природа є особистісно значущою життєвою цінністю, яка здатна емоційно відгукуватися на її стан, усвідомлювати наслідки власних дій і добровільно реалізовувати екологічно доцільну поведінку.

Подальші дослідження проблеми доцільно спрямувати на розроблення та експериментальну перевірку цілісної методики формування емоційно-ціннісного ставлення до природи в учнів початкових класів, конкретизацію критеріїв, показників і рівнів його сформованості та створення відповідного діагностичного інструментарію. Перспективним є вдосконалення навчально-методичного забезпечення екологічної освіти в умовах Нової української школи шляхом розроблення інтегрованих екологічних завдань, дослідницьких і

природоохоронних проєктів, практико-орієнтованих та рефлексивних завдань. Важливим напрямом залишається вивчення можливостей цифрових технологій, проєктного навчання та віртуальних ресурсів у поєднанні з безпосередньою взаємодією дітей із природою, а також дослідження партнерської взаємодії закладу освіти, сім'ї та громади у забезпеченні неперервності екологічного виховання.

References:

Бабаніна І. В. Формування екологічної культури молодших школярів. *Початкове навчання та виховання*. 2010. № 23 (243). С. 25–30. URL: https://surl.li/wfbccn

Бех І. Д. Особистість у ціннісному зростанні. *Сучасний інноваційний процес: сутність та інноваційний потенціал* : матеріали звітної науково-практичної конференції Інституту проблем виховання НАПН України за 2019 рік. Івано-Франківськ, 2020. Вип. 8. С. 7–11. URL: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/721448

Білик Л. І. Екологічна відповідальність : граючись навчаємось. Черкаси : Вертикаль, 2004. 240 с. URL: https://surl.li/pcnioy

Грошовенко О. П. Екологічне проектування як метод організації навчально-пізнавальної діяльності дітей старшого дошкільного та молодшого шкільного віку. *Молодий вчений*. 2015. № 3(2). С. 85–89. URL: https://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2015_3(2)__20

Демчук Л. І. Екологічна освіта та виховання учнів на уроках. *Проблеми формування екологічної свідомості особистості* : зб. наук. праць / за ред. О. А. Дубасенюк, О. Є. Антонової. Житомир : Житомирський держ. пед. ун-т, 2003. С. 30–32. URL: https://surl.li/ajtvvl

Жигайлова Р. Ігри як засіб екологічного виховання молодших школярів. *Сучасна школа України. Серія: Шкільний світ*. 2012. № 9. С. 71–79. URL: https://surl.li/wbkswz

Жирська Г. Я. Формування в учнів ціннісного ставлення до природи як компонента екологічної культури. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: педагогіка*. 2014. № 2. С. 74–81. URL: https://surl.li/fvyxuj

Зозуля Г., Агейкіна Р. Екологічна освіта молодших школярів. *Початкова освіта*. 2012. № 30. С. 24–25. URL: https://surl.li/dovcep

Концепція Нової української школи. Київ : Міністерство освіти і науки України, 2016. URL: https://surl.li/fjbblu

Крамар Л. Екологічне виховання в початковій школі. *Початкова школа*. 2014. № 2. С. 23–26. URL: https://surl.li/oltqyt

Магрламова К. Г. Формування ціннісного ставлення до природи у змісті екологічного виховання учнів загальноосвітніх шкіл. *Педагогічний процес: теорія і практика : зб. наук. праць* / Благод. фонд ім. А.С. Макаренка; [голов. ред. С.О. Сисоєва]. Київ : ЕКМО. 2008. Вип. 1. С. 141–147. URL: https://repo.dma.dp.ua/168/

Малинівська Л. І. Формування відповідального ставлення до природи як проблема в науковій літературі. *Вісник Житомирського державного університету імені Івана Франка*. 2008. Вип. 37. С. 174–177. URL: https://visnyk.zu.edu.ua/pdf/visnyk37.pdf.

Михайлик О. Г. Морально-естетичне ставлення людини до природи – важливий елемент екологічної культури сучасного суспільства. *Наукове пізнання: методологія та технологія. Філософія*. 2013. Вип. 1. С. 95–100. URL: https://np.pdpu.od.ua/1_2013/18.pdf.

Мозуль І. В. Виховання емоційно-ціннісного ставлення до природи в дітей молодшого шкільного віку. *Вісник Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка*. 2025. Вип. 3(59). С. 233–240. DOI: https://doi.org/10.31376/2410-0897-2025-3-59-233-240.

Нова українська школа: порадник для вчителя / за заг. ред. Н. М. Бібік. Київ : ТОВ «Видавничий дім «Плеяди», 2017. 206 с. URL: https://surl.li/zccsfp

Плохій З. Сучасний зміст екологічного виховання. *Рідна школа*. 2004. № 10. С. 3–6. URL: https://surl.li/ctvsxe

Пономаренко Л. Особливості формування екологічної культури в молодшому шкільному віці. *Початкова освіта. Серія: Шкільний світ*. 2010. № 14. С. 2–5. URL: https://surl.lt/oflbzu

Русова С. *З маловідомого і невідомого*. Ч. 1 : «Несторка української педагогічної літератури ...» / упоряд. О. Джус, З. Нагачевська. Івано-Франківськ : Гостинець, 2006. 456 с. URL: https://surl.li/amtzdt

Ткаченко П. І. Пізнавальні завдання для формування екологічної культури учнів. *Початкове навчання та виховання*. 2015. № 31/32. С. 40–52. URL: https://surl.li/uqqfyd

Чала В., Депетист О., Ярова Н. Виховання екологічної культури у молодших школярів. *Початкова освіта*. 2013. № 15. С. 12–23. URL: https://surl.li/odoakd

Шаульська Ю. Екологічне виховання в аспекті початкової школи. *Початкова освіта*. 2012. № 46. С. 2–4. URL: https://biblio.lib.kherson.ua/formuvannya-ekologichnoi-kulturi.htm

Шевчук К., Тирон О. Особливості розвитку у молодших школярів ціннісного ставлення до природи. *Збірник наукових праць Уманського державного педагогічного університету*. 2021. Вип. 3. С. 170–179. DOI: https://doi.org/10.31499/2307-4906.3.2021.241766

Barrable A., Booth D. Increasing Nature Connection in Children: A Mini Review of Interventions. *Frontiers in Psychology*. 2020. Vol. 11. Article 492. DOI: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00492

Mann J., Gray T., Truong S., Brymer E., Passy R., Ho S., Sahlberg P., Ward K., Bentsen P., Curry C., Cowper R. Getting Out of the Classroom and Into Nature: A Systematic Review of Nature-Specific Outdoor Learning on School Children's Learning and Development. *Frontiers in Public Health*. 2022. Vol. 10. Article 877058. DOI: https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.877058

Miller N. C., Kumar S., Pearce K. L., Baldock K. L. The Outcomes of Nature-Based Learning for Primary School Aged Children: A Systematic Review of Quantitative Research. *Environmental Education Research*. 2021. Vol. 27, No. 8. P. 1115–1140. DOI: https://doi.org/10.1080/13504622.2021.1921117

Moula Z., Palmer K., Walshe N. A Systematic Review of Arts-Based Interventions Delivered to Children and Young People in Nature or Outdoor Spaces: Impact on Nature Connectedness, Health and Wellbeing. *Frontiers in Psychology*. 2022. Vol. 13. Article 858781. DOI: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.858781

Schneiderhan-Opel J., Bogner F. X. The Effect of Environmental Values on German Primary School Students' Knowledge on Water Supply. *Water*. 2021. Vol. 13, No. 5. Article 702. DOI: https://doi.org/10.3390/w13050702

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-404
UDC 378.147:811.111:004.8

CHAPTER 12.
FROM LANGUAGE LEARNING TO DIGITAL INTELLIGENCE: RETHINKING ENGLISH EDUCATION IN THE AI ERA

Olha NOVIKOVA
Candidate of Philological Sciences, Associate Professor
Oles Honchar Dnipro National University,
Department of English Language for Non-Philological Specialities
(72, Nauky Avenue, Dnipro, 49010, Ukraine)
novikovaolga19911991@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9119-5154

Abstract. The article addresses the problem of transforming English language education under the rapid development of artificial intelligence and digital technologies. The study focuses on the challenges of integrating AI tools into the teaching and learning of English in higher education. Particular attention is paid to the use of generative AI, intelligent learning platforms, machine translation, and digital communication tools. The research examines the opportunities and limitations of these technologies for developing students' language competence and digital intelligence. The results demonstrate that AI-based tools can contribute to personalized learning, improve access to educational resources, and support the development of students' communicative, critical-thinking, and autonomous learning skills. The study also reveals that effective integration of AI requires appropriate pedagogical strategies and active teacher guidance. The findings indicate that excessive reliance on AI may create challenges related to academic integrity, reduced learner autonomy, and the reliability of automatically generated content. The research emphasizes the need to develop students' ability to critically evaluate and responsibly use AI-generated information. The study concludes that AI should be regarded as a complementary educational instrument rather than a substitute for the teacher. The results provide a basis for rethinking English language education and developing innovative, digitally oriented approaches to language teaching and learning.

Keywords: English language education; artificial intelligence; digital intelligence; digital technologies; language learning; generative AI; innovative teaching.

Introduction. The rapid development of artificial intelligence (AI), digital technologies, and online communication is fundamentally changing contemporary society and influencing the ways in which knowledge is acquired, processed, and

shared. Higher education is one of the areas experiencing particularly significant transformation, as digital technologies increasingly become an integral part of teaching, learning, assessment, and academic communication. English language education is especially sensitive to these changes because language learning has traditionally been closely connected with communication technologies, access to authentic materials, international interaction, and digital resources. Today, students can use a wide range of digital tools to practice language skills, communicate with other users, search for information, create texts, translate content, and receive immediate feedback. As a result, the traditional boundaries between classroom learning, independent study, and digital interaction are becoming increasingly flexible.

For many years, digital technologies in English language education were primarily associated with electronic textbooks, multimedia presentations, learning management systems, online dictionaries, language-learning applications, and video-conferencing platforms. These technologies expanded access to educational materials and enabled teachers to create more interactive learning environments. However, the emergence of artificial intelligence has introduced a qualitatively different stage of technological development. Unlike many earlier digital tools, AI-based systems are capable of analyzing language, generating original content, adapting responses to individual requests, simulating communication, providing explanations, and supporting learners in performing complex language-related tasks. Generative AI has therefore created new possibilities for designing personalized and interactive approaches to English language learning.

The growing popularity of generative AI tools has also changed students' expectations concerning language education. Learners can now request explanations of grammatical structures, generate examples of vocabulary in context, receive assistance with writing, practice conversations, summarize texts, translate information, and obtain suggestions for improving their language performance. Such opportunities can make learning more flexible and accessible and may help students

work at their own pace. At the same time, the availability of instant AI-generated answers creates new pedagogical challenges. If learners simply rely on automatically generated content instead of analyzing, questioning, and transforming information themselves, technology may reduce rather than strengthen certain aspects of independent learning. Consequently, the educational value of AI depends not only on the technological capabilities of particular tools but also on the way these tools are integrated into the learning process.

The problem statement. One of the central problems is therefore how to move from the simple use of digital technologies to the development of meaningful digital intelligence. Digital intelligence can be understood as a combination of technological, cognitive, communicative, ethical, and critical abilities that enable individuals to use digital technologies effectively and responsibly. In the context of English language education, this concept goes beyond the ability to operate digital applications. Students need to understand how AI systems produce information, recognize the limitations of automatically generated content, identify potentially inaccurate or biased responses, formulate effective prompts, evaluate sources, protect personal data, and respect copyright and academic integrity. These abilities are becoming increasingly important as AI-generated texts, translations, images, and other forms of digital content become more widespread.

The integration of AI also influences the professional role of the English language teacher. The teacher is no longer the only source of linguistic information available to students, as learners can obtain explanations and examples from a variety of AI-based systems. Nevertheless, this does not eliminate the need for professional pedagogical guidance. On the contrary, the increasing complexity of the digital learning environment requires teachers to select appropriate technologies, formulate meaningful learning tasks, evaluate AI-generated content, monitor students' progress, and teach learners to use technological resources critically. The teacher's role is consequently shifting from the transmission of information towards the organization, facilitation, and critical supervision of the learning process.

Another important issue concerns assessment. Traditional forms of written assignments may become more difficult to interpret when students have unrestricted access to generative AI. A text produced with the assistance of an AI system may not accurately represent a student's independent language competence. This situation encourages educators to reconsider assessment practices and place greater emphasis on process-oriented activities, oral interaction, reflection, individual responses, project work, and tasks requiring students to demonstrate their reasoning. AI therefore challenges not only established teaching methods but also conventional approaches to measuring language proficiency.

The use of AI in English language education also raises questions concerning academic integrity, data privacy, authorship, reliability, and responsible technology use. AI-generated content may contain factual inaccuracies, inappropriate formulations, fabricated references, or culturally problematic information. Machine-generated language can also appear convincing even when its content is incorrect. For this reason, students should be taught to treat AI-generated responses as resources that require verification rather than as unquestionable sources of knowledge. Developing such critical attitudes is particularly important in higher education, where students are expected to work independently with academic information and demonstrate responsibility for the content they produce.

At the same time, the integration of AI should not be viewed exclusively in terms of risks. Properly designed AI-supported activities can create opportunities for individualized learning, additional language practice, rapid feedback, differentiated instruction, and increased learner autonomy. AI tools can help students practice communication in situations that may be difficult to reproduce in a traditional classroom, experiment with different forms of written and spoken English, and receive additional explanations when they encounter linguistic difficulties. For teachers, AI can assist in preparing exercises, adapting materials to different proficiency levels, generating discussion prompts, and developing supplementary learning resources. These possibilities suggest that AI can become a valuable

component of contemporary English language education when its use is guided by clear pedagogical principles.

Analysis of recent studies and publications. The relevance of the present study is therefore determined by the need to reconsider the objectives and practices of English language education in response to the rapid development of artificial intelligence. The issue is not simply whether AI should be used in language teaching, but how it can be incorporated in ways that preserve meaningful human communication, promote independent thinking, and strengthen rather than replace students' learning efforts. The transition from traditional language learning towards digitally supported learning requires an integrated approach in which linguistic competence and digital intelligence develop simultaneously.

The purpose of this study is to examine the transformation of English language education in the context of artificial intelligence and to identify the opportunities and challenges associated with the integration of AI-based technologies into language teaching and learning. The study focuses on the educational potential of generative AI, intelligent digital platforms, machine translation, and other technological tools for developing students' communicative competence, critical thinking, learner autonomy, and digital skills. Particular attention is given to the changing role of the teacher, the transformation of learning activities and assessment, and the importance of responsible AI use. The study argues that the future development of English language education should be based not merely on technological innovation but on the balanced integration of artificial intelligence, effective pedagogy, human interaction, and digital intelligence.

The integration of artificial intelligence into English language education represents one of the most significant developments in the digital transformation of contemporary higher education. Over the last decade, digital technologies have gradually changed the traditional organization of foreign language teaching by providing learners with access to electronic textbooks, online dictionaries, multimedia resources, learning management systems, video-conferencing platforms,

mobile applications, and interactive educational environments. However, the emergence of artificial intelligence marks a new stage in this transformation because AI-based technologies are capable not only of storing, presenting, or transmitting educational information but also of generating, analyzing, adapting, and transforming linguistic content in response to individual user requests. This difference is particularly important for English language education, where effective learning requires continuous interaction with language, exposure to diverse linguistic models, opportunities for communication, regular practice, and timely feedback. Generative AI systems can produce texts on specific topics, create vocabulary and grammar exercises, explain complex linguistic phenomena, provide examples of language use, simulate conversations, formulate questions, summarize academic materials, translate texts, and suggest alternative ways of expressing ideas in English. Consequently, students are no longer limited to a fixed set of materials prepared in advance by a teacher or included in a textbook. They can interact with digital systems in a flexible and dynamic way, requesting additional explanations, examples, corrections, or practice activities according to their immediate learning needs. For instance, a student studying English for professional purposes can ask an AI system to generate a dialogue between specialists in a particular field, explain specialized terminology, create a short professional text containing target vocabulary, or provide questions for discussion based on a professional situation. A student developing academic writing skills can use AI to identify possible problems in the structure of a text, receive suggestions for improving coherence and vocabulary, compare different formulations, or practice paraphrasing and summarizing *(Bowen, 2024).*

Similarly, learners preparing for examinations can generate additional practice tasks, revise vocabulary, receive explanations of incorrect answers, and organize individualized revision activities. Such applications demonstrate that AI can provide learners with a considerably larger amount of language practice than may be possible during limited classroom time. At the same time, the educational significance of AI does not lie simply in the quantity of materials it can generate. Its main potential is

connected with the possibility of creating a more responsive learning environment in which educational content can be adapted to the learner's level, purpose, interests, and progress. This is particularly valuable in heterogeneous university groups, where students often demonstrate different levels of English proficiency and require different forms of support. AI can potentially provide additional explanations to students who experience difficulties while offering more complex tasks to those who are ready for a greater challenge. It can also support different learning styles by presenting information through examples, questions, dialogues, summaries, explanations, or practical tasks. Furthermore, AI technologies can contribute to the development of communicative competence by creating simulated situations in which students can practice English without the pressure that may accompany communication in front of classmates. Conversational AI can function as a virtual communication partner, allowing learners to practice professional interviews, academic discussions, presentations, everyday conversations, or problem-solving activities. Such interaction can encourage students to experiment with vocabulary and grammatical structures and gradually develop greater confidence in using English *(Bowen, 2024).*

Nevertheless, the integration of AI should not be interpreted as a replacement for traditional language-learning practices or direct human communication. Language is not merely a collection of grammatical structures and vocabulary items that can be generated automatically; it is also a means of expressing intentions, constructing meaning, interpreting cultural contexts, negotiating ideas, and establishing relationships between people. Therefore, AI-generated interaction cannot fully reproduce the complexity of authentic human communication. The role of the teacher remains essential in selecting appropriate tasks, establishing learning objectives, monitoring students' progress, evaluating the quality of AI-generated materials, correcting inaccuracies, and creating opportunities for meaningful interpersonal communication.

In this respect, artificial intelligence should be regarded as an additional pedagogical resource that can expand the teacher's methodological possibilities rather than eliminate the need for professional teaching. The effective use of AI also requires students to understand that generated information may contain errors, inappropriate formulations, biased interpretations, or misleading explanations. Therefore, learners need to develop the ability to question, verify, compare, and critically evaluate AI-generated content. This requirement leads directly to the concept of digital intelligence, which involves not only the technical ability to use digital tools but also the cognitive, communicative, ethical, and critical skills necessary for responsible interaction with technology. In English language education, the transition from digital literacy to digital intelligence means that students should learn not only how to use AI but also when its use is appropriate, how to formulate effective requests, how to evaluate the quality of generated language, how to recognize unreliable information, and how to use technological assistance without losing responsibility for their own learning outcomes. Thus, the growing presence of artificial intelligence is transforming English language education from a model primarily focused on access to digital resources into a more interactive, personalized, and technologically mediated learning environment. The central challenge for contemporary educators is to ensure that this transformation strengthens rather than weakens students' linguistic competence, independent thinking, creativity, and ability to communicate effectively in real-world contexts *(Bowen, 2024).*

An additional dimension of AI-supported English language education is its potential to transform the organization of students' independent work. In conventional educational settings, independent learning is often limited by the availability of appropriate materials, the amount of time a teacher can devote to individual consultations, and students' ability to identify and address their own linguistic difficulties. AI technologies can partially overcome these limitations by providing learners with continuous access to explanations, examples, practice tasks, and interactive activities. Students can use AI tools at different stages of the learning

process: before studying a new topic, during the acquisition of new material, while completing practical tasks, and after finishing an assignment. For example, before reading a professional text, learners can ask an AI system to introduce key terminology or explain potentially difficult concepts. During the learning process, they can request additional examples or clarification of unfamiliar structures. After completing a written task, students can compare their original text with AI-generated suggestions and identify areas that require further improvement. Such a process can encourage learners to become more actively involved in monitoring their own progress and identifying individual learning needs.

AI technologies can also contribute to the development of learner autonomy. Autonomous learning requires students to take responsibility for setting goals, selecting appropriate learning strategies, monitoring their performance, and evaluating the results of their efforts. AI can support each of these stages by helping learners formulate realistic learning objectives, generate individualized practice materials, and reflect on their performance. For example, a student may establish a goal of improving academic vocabulary over a specific period and use an AI system to create a personalized sequence of vocabulary activities. The learner can then practice the target words in different contexts, produce their own examples, and receive feedback on their usage. In this way, technology can help transform students from passive recipients of educational information into active participants who make decisions about their own learning. Nevertheless, autonomy should not be confused with technological independence. Students still require methodological knowledge and critical awareness to determine whether the suggestions provided by AI are appropriate and whether the generated material corresponds to their actual learning objectives *(Narciso, 2024).*

Another important area of application is the development of writing skills. Writing in English is a complex process involving idea generation, organization, lexical and grammatical choices, coherence, cohesion, revision, and editing. AI-based tools can support different stages of this process by helping learners brainstorm ideas,

identify possible structural problems, compare alternative formulations, and receive language-focused feedback. This can be particularly useful for students who have difficulties beginning a text or organizing their ideas in a logical sequence. At the same time, educational practice should distinguish between using AI as a learning assistant and allowing AI to produce an entire assignment on behalf of the student. If learners simply submit automatically generated texts, they may avoid the cognitive processes through which writing competence develops. Therefore, AI-supported writing activities should encourage students to retain authorship, explain their choices, revise generated suggestions, and demonstrate their ability to formulate and organize ideas independently.

The use of AI can similarly influence the development of reading and listening skills. AI systems can help teachers adapt authentic materials to different levels of language proficiency, generate comprehension questions, identify key vocabulary, and create follow-up activities. Complex academic or professional texts can be accompanied by glossaries, summaries, discussion questions, or tasks focusing on specific language features. In listening practice, AI-supported tools can facilitate the creation of transcripts, vocabulary exercises, comprehension checks, and pronunciation activities. Such possibilities are particularly relevant for students studying English for specific purposes, as learning materials can be connected with their professional fields and therefore become more meaningful and motivating. However, adaptation should not eliminate the challenge that authentic language presents. Learners should gradually develop the ability to understand naturally occurring English, including different accents, speech rates, vocabulary choices, and communicative contexts *(Narciso, 2024).*

AI can also support the development of speaking and pronunciation skills. Conversational systems allow students to engage in simulated interactions without requiring the immediate presence of another person. Learners can practice asking and answering questions, presenting arguments, participating in professional dialogues, conducting interviews, or responding to hypothetical situations. Speech-recognition

technologies can provide additional opportunities to identify pronunciation difficulties and practice particular sounds or phrases. This can be especially beneficial for students who are reluctant to speak in front of a group or who need more frequent practice than classroom time allows. Nevertheless, simulated communication should complement rather than replace interaction with teachers and other learners. Real communication involves emotional responses, cultural expectations, non-verbal signals, negotiation of meaning, and unpredictable reactions that cannot always be accurately reproduced by an AI system.

The pedagogical effectiveness of these technologies therefore depends on the principles according to which they are incorporated into the educational process. Simply providing students with access to AI does not automatically improve language learning outcomes. Teachers need to design tasks that require learners to analyze AI-generated content, compare different answers, identify inaccuracies, justify their choices, and transform generated material into their own meaningful output. Such activities can turn AI from an answer-generating mechanism into an object of critical inquiry and a tool for developing higher-order thinking. For example, instead of asking students to use AI to write an essay, a teacher can ask them to evaluate an AI-generated text, identify linguistic and factual weaknesses, improve its structure, verify the information, and explain the changes they have made. This approach allows technological tools to become part of a broader learning process rather than a substitute for intellectual effort *(Narciso, 2024).*

The integration of artificial intelligence also creates opportunities for more flexible forms of English for Specific Purposes (ESP) instruction. University students increasingly need English connected with their future professional activities, including information technology, engineering, economics, medicine, international relations, environmental studies, and other fields. AI can facilitate the creation of specialized learning materials that reflect the terminology, genres, communicative situations, and professional contexts of particular disciplines. Students can work with simulated professional emails, reports, presentations, technical descriptions, research

abstracts, interviews, case studies, and workplace dialogues. This makes it possible to establish a closer connection between language learning and students' future professional communication. At the same time, teachers need to verify specialized terminology and ensure that AI-generated materials are accurate, relevant, and appropriate for the particular professional field.

Consequently, the integration of artificial intelligence into English language education should be understood as a complex pedagogical transformation rather than merely the introduction of another digital tool. Its potential is particularly significant when AI is used to increase opportunities for meaningful practice, personalize learning, support reflection, and develop students' ability to work critically with digital information. The transition from language learning to digital intelligence requires learners to combine linguistic knowledge with technological awareness, critical thinking, ethical responsibility, and the ability to make informed decisions. In this model, the successful English learner is not simply a person who knows how to use an AI application but an individual who can use digital technologies purposefully while maintaining intellectual independence and responsibility for the learning process.

One of the most promising aspects of artificial intelligence in English language education is its ability to transform conventional language-learning activities into interactive and individualized learning experiences. Instead of using AI only for obtaining ready-made answers, students can be encouraged to interact with it as a language-learning partner, editor, simulator, and source of alternative perspectives. This approach makes it possible to develop different language skills within the same educational activity. For example, a traditional vocabulary exercise in which students simply match professional terms with their definitions can be transformed into an AI-supported problem-solving task. Students studying information technology may be asked to provide an AI system with a list of terms such as "cyberattack," "firewall," "data breach," "encryption," and "malware" and request a short scenario describing a cybersecurity incident. Students then read the scenario, identify the relevant

terminology, explain the problem, and propose a solution in English. The important element is that the AI-generated text becomes a starting point for communication and analysis rather than the final product. Students can subsequently ask the system to make the scenario more difficult, introduce an unexpected complication, or change the professional roles of the participants. In this way, one vocabulary list can generate a sequence of increasingly complex communicative tasks.

A similar approach can be applied to the development of speaking skills. AI-based conversational tools can simulate situations that students may encounter in their future professional lives. An engineering student, for instance, can participate in a simulated meeting in which an AI system acts as a project manager and asks the student to explain why a technical problem has occurred. An international relations student can take part in a simulated diplomatic discussion in which the AI represents a foreign delegation and presents an unexpected counterargument. A computer science student can conduct a mock job interview in English, answering questions about technical skills, previous projects, teamwork, and problem-solving. After the interaction, students can analyze their own performance and ask the AI to identify recurring vocabulary, grammatical, or communicative problems. The teacher can then use these observations to design follow-up activities focused on the specific needs of the group. Such simulations can make speaking practice more frequent and less dependent on the limited amount of classroom time available for individual interaction.

AI can also introduce an element of unpredictability into language-learning activities, making them more similar to authentic communication. Instead of memorizing a fixed dialogue, students can be given a professional situation with a specific objective and asked to respond to changing circumstances. For example, students may be told that they are presenting a new digital product to an international client. The AI initially acts as a potential customer and asks ordinary questions about the product. During the conversation, however, it introduces a problem: the client is dissatisfied with the price, raises concerns about data security, or requests a change in

the delivery schedule. The student must respond spontaneously, clarify the situation, negotiate, and propose a solution. Such an activity simultaneously develops vocabulary, grammar, fluency, interactional competence, and problem-solving skills. More importantly, students learn that successful communication is not simply the production of grammatically correct sentences but the ability to react appropriately to changing communicative circumstances *(Narciso, 2024).*

Another interesting application of AI concerns the development of critical reading skills. Students can be provided with an AI-generated text containing several deliberate inaccuracies, weak arguments, inappropriate word choices, or unsupported claims. Their task is not to accept the text as correct but to investigate it and identify its weaknesses. For example, students may receive a short article about the impact of artificial intelligence on employment and be asked to identify statements that require verification, distinguish facts from opinions, and suggest more precise formulations. They can compare the AI-generated text with reliable academic or professional sources and explain which claims are supported by evidence and which are not. This activity is particularly valuable because it changes the learner's position from a passive consumer of digital information to an active evaluator of that information. Students simultaneously practice reading comprehension, vocabulary, argumentation, source evaluation, and academic English.

Generative AI can also be used creatively in writing instruction. Rather than asking students to generate an essay automatically, teachers can organize a "human versus AI editor" activity. Students first write a short paragraph independently and then ask an AI system to suggest improvements. They compare the original version with the AI-assisted version and classify the proposed changes into several categories, such as grammar, vocabulary, style, coherence, and meaning. Students then decide which suggestions should be accepted and which should be rejected. In some cases, an AI suggestion may be grammatically correct but change the intended meaning or make the text unnecessarily complicated. Students have to justify their decisions in English. This activity develops not only writing skills but also

metalinguistic awareness and the ability to evaluate language critically *(Ilic, Casebourne, Wegerif, 2024).*

An even more engaging activity can be based on the concept of "AI detective." Students receive a short text produced by an AI system and are told that it contains a number of hidden problems. These may include an invented fact, an inappropriate collocation, a false cognate, an incorrect technical term, an unnatural sentence, or a misleading interpretation. Working individually or in groups, students have to find the problems and provide corrections. For example, an IT-related text might incorrectly use "privacy" where "confidentiality" is required in a particular context, or confuse "authentication" with "authorization." Students must explain why the original expression is problematic and provide a more appropriate alternative. The activity turns error correction into a form of investigation and encourages students to treat AI-generated content critically rather than assuming that fluent language is necessarily accurate language.

Another useful possibility is the creation of personalized "language challenges." Students can ask an AI system to identify five areas that they need to improve based on a sample of their writing or speaking. They can then create a weekly challenge focused on these areas. A student who frequently repeats the same vocabulary may receive a task requiring the use of alternative expressions and collocations. A student who has difficulty with complex sentence structures may practice combining short statements into logically connected academic sentences. A learner preparing for a professional interview may receive a series of increasingly difficult questions and be required to answer them without using certain frequently repeated words. The teacher can monitor these activities and transform common difficulties into classroom tasks. In this way, AI can help connect individual learning trajectories with collective classroom instruction.

The use of AI can also make vocabulary learning more contextualized and professionally relevant. Instead of memorizing isolated definitions, students can ask an AI system to place new words into different communicative situations. For

example, the word “issue” can be presented in technical, academic, business, and everyday contexts, allowing students to observe differences in meaning and usage. Students can then be asked to create their own examples, identify collocations, and explain which context each meaning belongs to. For specialized terminology, AI can generate short professional cases in which students have to select the correct term and justify their choice. Such activities help learners move from recognizing vocabulary to using it actively and appropriately.

AI-supported learning can further contribute to intercultural communication. Students can simulate conversations with people from different cultural backgrounds and examine how the same communicative intention can be expressed differently depending on context. For example, a student may be asked to write an email requesting a deadline extension from a professor, a colleague, or an international business partner. The AI can generate several versions and students can discuss differences in politeness, directness, formality, and tone. They can then rewrite the messages themselves and explain why particular expressions are appropriate for each situation. Such activities demonstrate that effective English communication involves not only grammatical accuracy but also pragmatic and intercultural competence.

These examples demonstrate that the educational value of AI depends largely on the way in which tasks are designed. When students use artificial intelligence simply to translate, complete exercises, or generate ready-made assignments, the technology may reduce the amount of independent cognitive work required from them. When AI is incorporated into activities involving comparison, evaluation, correction, negotiation, reflection, and creative production, it can instead become a powerful instrument for developing higher-order skills. The most productive model therefore combines AI-generated input with human analysis and decision-making. Students receive technological assistance but remain responsible for interpreting information, checking its reliability, making linguistic choices, and producing their own final responses. In this way, AI-supported English language education can move beyond the traditional model of “learning English with digital tools” towards a

broader model in which students learn to use language, technology, and critical thinking together. This transition is central to the development of digital intelligence and prepares learners not only to communicate in English but also to function effectively and responsibly in increasingly AI-mediated academic and professional environments *(Ilic, Casebourne, Wegerif, 2024).*

The development of digital intelligence in English language education requires a gradual transition from teaching students how to operate digital tools to teaching them how to make informed decisions about the use of these tools. This distinction is particularly important in the context of generative artificial intelligence, because modern AI systems are designed to produce fluent and convincing responses even when the information they provide is incomplete, inaccurate, or misleading. A student who assumes that grammatically correct AI-generated content is automatically reliable may accept incorrect information without further verification. Consequently, critical evaluation should become an integral component of AI-supported language learning. Students need to develop the ability to question the information they receive, compare different responses, identify inconsistencies, verify factual claims, and recognize situations in which an AI system does not provide sufficient evidence. In English classes, these abilities can be developed through activities in which students deliberately compare AI-generated answers with information from textbooks, academic articles, professional websites, or other reliable sources. The objective is not simply to determine whether an AI response is "right" or "wrong," but to understand why a particular response is reliable, incomplete, ambiguous, or inappropriate.

An effective example is the "three sources challenge," in which students receive an AI-generated explanation of a professional concept and are required to compare it with two independent sources. Students highlight information that appears in all three sources, identify differences, and investigate contradictory statements. They then prepare a short conclusion explaining which information can be accepted and which requires further verification. Such an activity combines English reading

skills with information literacy and critical thinking. It can be adapted to virtually any academic specialization. Engineering students might compare AI-generated explanations of renewable energy technologies with professional sources; computer science students might investigate definitions related to artificial intelligence or cybersecurity; economics students might compare explanations of inflation or financial risk; and students of international relations might examine how the same political or diplomatic concept is defined in different sources. The language classroom thus becomes a space in which students learn not only how to communicate in English but also how to navigate an increasingly complex digital information environment *(Ilic, Casebourne, Wegerif, 2024).*

Another important component of digital intelligence is the ability to formulate effective instructions for AI systems. The quality of an AI-generated response often depends on the clarity and specificity of the user's request. This creates an opportunity to incorporate prompt design into English language education. Students can be asked to formulate several versions of the same request and then compare the resulting answers. For example, the simple instruction "Explain climate change" can be transformed into a much more specific request such as "Explain three major causes of climate change in approximately 150 words using B2-level English and provide two examples related to urban environments." Students can then analyze how changes in the prompt influence vocabulary, grammatical complexity, organization, and relevance. This activity develops linguistic precision because students need to formulate clear instructions and specify communicative purposes. At the same time, it develops technological awareness by showing learners that effective interaction with AI requires intentional communication rather than random questioning.

Prompt-based activities can also be used to develop academic writing skills. Students may be given a research topic and asked to create prompts for generating possible arguments, counterarguments, examples, or questions for further investigation. They can then evaluate the generated material and select only those ideas that are relevant to their own position. For instance, a student writing about the

influence of artificial intelligence on higher education might ask an AI system to provide arguments supporting and challenging the integration of AI into university teaching. Instead of copying these arguments, the student evaluates their logical consistency, searches for evidence, and develops an independent position. The process therefore shifts the focus from obtaining a ready-made text to using AI as a tool for brainstorming and intellectual exploration.

This approach is particularly important for maintaining academic integrity. The availability of generative AI has made it easier for students to produce essays, reports, presentations, and other assignments without demonstrating the underlying knowledge or language competence themselves. However, simply prohibiting AI use may not be an effective long-term educational strategy because students are increasingly likely to encounter AI in their academic and professional lives. A more sustainable approach is to teach students responsible and transparent use of AI. Teachers can establish clear rules concerning which types of AI assistance are acceptable and which are inappropriate. For example, students may be allowed to use AI to generate ideas, identify language errors, or suggest alternative vocabulary, while being required to write the final text independently and explain how technological assistance was used. Such practices can transform academic integrity from a set of restrictions into a component of digital responsibility.

Assessment practices also need to respond to these developments. If an assignment can be completed almost entirely through generative AI, its educational value may be limited. Therefore, teachers can design tasks that require personal experience, individual reflection, oral explanation, collaboration, or several stages of development. For example, instead of asking students to submit a final essay on “The Future of Artificial Intelligence,” a teacher can ask them to submit a sequence of materials: an initial outline, selected sources, a first draft, an AI-generated feedback report, a revised version, and a short reflection explaining which suggestions they accepted or rejected. Students can then present their main arguments orally and answer questions from the teacher. Such an assessment format makes the learning

process visible and provides stronger evidence of the student's actual engagement with the task.

A particularly effective assessment activity can be based on an "AI revision diary." Students keep a short record of how they use AI while preparing an English assignment. They indicate what they asked the system to do, what response they received, which suggestions they accepted, which they rejected, and why. At the end of the task, students write a brief reflection on what they learned from the interaction. This approach develops metacognitive awareness because learners are encouraged to think about their own decisions and learning strategies. It also reinforces the idea that responsibility for the final product remains with the student. From the teacher's perspective, such a diary can provide useful information about students' actual learning processes and reveal common difficulties that may require additional instruction *(Ilic, Casebourne, Wegerif, 2024).*

The changing technological environment also affects the role of the English language teacher. The teacher is increasingly becoming a designer of learning experiences rather than simply a provider of linguistic information. Since students can access explanations and examples from AI systems at any time, the teacher's contribution is particularly valuable in selecting meaningful tasks, establishing learning objectives, providing contextualized guidance, facilitating interaction, and evaluating the quality of learning outcomes. The teacher can also help students distinguish between situations in which AI assistance is useful and situations in which direct human interaction or independent thinking is more appropriate. For example, AI may be highly effective for generating vocabulary practice or simulating a job interview, whereas a real group discussion may be more valuable for developing negotiation skills, empathy, turn-taking, and spontaneous interpersonal communication.

This changing role requires teachers themselves to develop a high level of digital intelligence. Teachers need to understand the basic principles and limitations of AI systems, evaluate educational applications critically, protect students' personal

information, and design activities that encourage responsible technology use. Professional development in this area should therefore go beyond technical training. Knowing how to open or operate an AI platform is not sufficient. Teachers need to understand how AI affects language acquisition, assessment, academic integrity, learner autonomy, and classroom interaction. They also need to develop the ability to evaluate whether a particular AI tool genuinely contributes to a learning objective or simply introduces technology without meaningful pedagogical value.

An important consideration is the ethical dimension of AI-supported language education. Students should be aware that digital systems may process personal information and that not every type of information should be entered into an AI platform. In professional English courses, for example, students may work with documents containing confidential business information, personal data, or unpublished research results. Teachers should therefore introduce basic principles of responsible digital behavior, including data protection, respect for intellectual property, appropriate citation, and careful handling of sensitive information. These issues can themselves become topics for English language activities. Students can analyze short case studies involving data privacy or copyright and discuss appropriate actions using professional English. Thus, ethical digital education can be integrated naturally into language learning rather than treated as a separate theoretical topic.

The development of digital intelligence should also include an awareness of linguistic and cultural limitations. AI systems may generate language that is grammatically acceptable but pragmatically inappropriate in a particular cultural or professional context. A phrase that sounds natural in one situation may appear overly direct, informal, or impersonal in another. Students can investigate such differences by asking AI to produce several versions of the same message for different audiences. For example, they can compare an email written to a close colleague with one addressed to a university professor or an international business partner. They can then analyze differences in greetings, requests, modal verbs, degree of directness, and closing formulas. This kind of activity demonstrates that effective communication

involves more than grammatical correctness and requires sensitivity to audience, purpose, relationship, and context.

The same principle applies to machine translation. AI-powered translation tools can be extremely useful for understanding unfamiliar information and comparing linguistic structures, but they can also produce literal translations, inappropriate terminology, or stylistic choices that do not correspond to the intended meaning. Instead of prohibiting translation tools, teachers can use them as objects of analysis. Students may receive an original Ukrainian text, an AI-generated English translation, and a professionally edited version. Their task is to identify differences, explain problematic choices, and produce an improved translation. This activity develops translation competence, vocabulary awareness, grammar, and critical evaluation simultaneously. It also teaches students that technological assistance does not remove the need for linguistic expertise *(Ilic, Casebourne, Wegerif, 2024).*

Ultimately, the development of digital intelligence in English language education should be viewed as a process of combining linguistic competence, technological awareness, critical thinking, and ethical responsibility. Students need to become capable of moving between human and artificial forms of communication without becoming completely dependent on either. They should be able to use AI when it increases the effectiveness of learning, reject it when independent thinking or authentic human interaction is more appropriate, and critically evaluate its output whenever accuracy matters. Such an approach creates a more balanced educational model in which technology supports learning without determining its goals. The central objective is therefore not to teach students to use as many AI tools as possible, but to help them understand how, why, and when these tools can contribute to meaningful English language learning. In this sense, the movement from language learning to digital intelligence represents not the replacement of traditional language education but its expansion into a new educational environment in which linguistic, cognitive, technological, and ethical competencies increasingly intersect.

Artificial intelligence also creates substantial opportunities for developing the four fundamental language skills – reading, listening, speaking, and writing – in an integrated learning environment. One of the major advantages of AI-supported instruction is that the same digital resource can be transformed into a variety of tasks targeting different aspects of language competence. For example, a short authentic article about the development of autonomous vehicles can initially be used as a reading activity in which students identify the main idea, locate specific information, and infer the meaning of unfamiliar terminology from context. An AI system can then generate comprehension questions at different levels of difficulty, allowing the teacher to differentiate the activity for students with different levels of English proficiency. Students can subsequently create a glossary of key terms, classify the vocabulary according to professional and general English, and use selected words in their own sentences. The same text can become the basis for a speaking activity in which students discuss whether autonomous vehicles should be widely introduced in urban environments. In this way, one authentic source can support reading comprehension, vocabulary development, critical thinking, and oral communication without separating these skills into isolated exercises.

AI can be particularly useful for adapting authentic materials to learners' linguistic needs. University students often encounter professional texts that contain complex terminology, long sentences, abbreviations, and concepts that may be difficult to understand even when the general topic is familiar. Instead of simplifying the entire text automatically, teachers can ask AI to identify potentially problematic vocabulary, explain selected concepts, or create preparatory activities while preserving the authenticity of the original material. For instance, students studying computer science may work with an authentic text concerning cybersecurity threats. Before reading it, they can receive a short vocabulary preview containing terms such as "phishing," "ransomware," "vulnerability," "authentication," and "data breach." After reading, students can be asked to explain how these concepts are connected and use them to describe a hypothetical cybersecurity incident. The activity develops both

linguistic competence and professional conceptual knowledge. Importantly, students learn vocabulary not as isolated dictionary entries but as elements of a meaningful professional discourse *(Bowen, 2024).*

The development of listening skills can also benefit from AI technologies. Listening is often considered one of the more challenging aspects of foreign language learning because students have to process language in real time while dealing with different accents, speech rates, vocabulary, and pronunciation patterns. AI-based tools can facilitate the creation of listening materials adapted to specific learning objectives. A teacher can prepare a professional dialogue and use an AI-supported voice system to produce an audio version, after which students can complete comprehension tasks, identify key information, reconstruct missing parts of the dialogue, or summarize what they have heard. More advanced learners can work with several versions of the same message delivered at different speech rates or with different pronunciation models. For example, students preparing for international professional communication may listen to a simulated meeting between participants with different varieties of English and identify differences in pronunciation and communicative style. Such activities can help students develop greater flexibility in understanding English as an international language rather than associating successful listening exclusively with one pronunciation model.

AI can further support speaking practice by providing students with opportunities for repeated interaction. In a conventional classroom, speaking time is necessarily limited because a teacher cannot conduct an extended individual conversation with every student during every lesson. AI-supported conversational practice can partially address this limitation by allowing learners to engage in additional speaking activities outside the classroom. Students can simulate a job interview, participate in a professional meeting, explain a technical process, describe a research project, or defend a particular viewpoint. For example, an engineering student might be asked to explain the cause of a machine failure to a fictional international client. The AI can respond as the client, asking for clarification or

requesting additional information. If the student says, “The problem is because the system was overloaded,” the AI-supported activity can be used to explore more precise alternatives such as “The problem occurred because the system was overloaded” or “The failure resulted from excessive system load.” The student therefore receives an opportunity to improve both grammatical accuracy and professional precision within a realistic communicative situation.

An especially valuable feature of AI-supported speaking practice is the possibility of introducing changing conditions into a dialogue. Real communication rarely follows a predictable script, and learners need to develop the ability to react spontaneously when the conversation takes an unexpected direction. A teacher can therefore design a simulation in which the AI gradually introduces new problems. For example, students may participate in a simulated international conference discussion. At first, they are asked to present their research topic. The AI then asks a challenging question, disagrees with one of their arguments, requests evidence, or asks them to explain a complex idea in simpler English. Students must adapt their responses rather than reproduce memorized phrases. This type of activity develops fluency, interactional competence, paraphrasing skills, and the ability to negotiate meaning. It can also help students become more comfortable with situations in which they do not have complete control over the direction of communication *(Bowen, 2024).*

Writing instruction offers another area in which AI can support a process-oriented approach. Instead of using AI to produce complete essays, students can employ it at individual stages of the writing process. During brainstorming, AI can help generate possible research questions or alternative perspectives. During planning, it can suggest possible organizational structures that students then critically evaluate. During drafting, students can ask for feedback on specific aspects of their writing, such as cohesion, vocabulary, or sentence structure. During revision, they can compare their original version with suggested alternatives and decide which changes improve the text. Finally, students can reflect on the changes and explain how their writing has developed. This approach maintains the student’s responsibility

for the final product while using AI as a form of supplementary feedback. It also encourages learners to understand writing as a recursive process involving planning, drafting, reviewing, revising, and editing rather than as a single act of producing a finished text.

A particularly effective classroom activity is the "AI editor" task. Students first write a short paragraph independently on a topic related to their field of study. They then ask an AI system to identify five possible improvements without rewriting the entire paragraph. Students examine each suggestion and decide whether it should be accepted. Some suggestions may improve grammatical accuracy, while others may unnecessarily change the student's intended meaning or introduce vocabulary that is too advanced or inappropriate for the context. Students must justify their decisions and produce a final revised version. The teacher can then discuss the most interesting examples with the class. This activity develops editing skills and helps students understand that good writing involves making deliberate linguistic choices rather than simply accepting every correction provided by a digital system.

AI can also facilitate integrated project-based learning. Students can work in groups on a professional or socially relevant problem and use AI at different stages of the project. For example, a group of students studying environmental engineering can investigate the question of how cities can reduce plastic waste. They can use English-language sources to collect information, ask AI to help organize possible arguments, create a vocabulary list, prepare questions for an interview, and simulate a discussion between different stakeholders. The final project might consist of a written proposal, an oral presentation, and a simulated public discussion. Throughout the project, students are required to distinguish between information obtained from AI and information verified through independent sources. Such projects combine language development with research skills, collaboration, problem-solving, and digital literacy.

Another promising application is the use of AI for formative assessment. Rather than waiting until the end of a course to discover persistent language problems, students can receive continuous feedback during the learning process. AI

can help identify frequently repeated grammatical errors, limited vocabulary, problems with sentence organization, or weaknesses in coherence. However, the purpose of such feedback should be diagnostic rather than merely corrective. Students should be encouraged to identify patterns in their errors and develop strategies for avoiding them in future communication. For example, if a student repeatedly uses simple sentence structures in academic writing, the teacher can design a follow-up activity focusing on complex sentences, participial clauses, linking devices, and logical relationships between ideas. AI-generated feedback can therefore serve as an initial source of information that is interpreted and transformed into meaningful pedagogical action.

The integration of AI across reading, listening, speaking, and writing also supports the development of transferable communication skills. In contemporary academic and professional environments, these skills rarely function independently. A specialist may need to read a technical document, listen to a colleague's explanation, discuss a problem, and then write a report summarizing the agreed solution. AI-supported learning can reproduce such complex communicative sequences. For example, students may first listen to a short meeting about a technical problem, read a related report, discuss possible solutions in pairs, and finally write an email recommending a particular course of action. AI can assist in generating or adapting the materials at each stage, but students remain responsible for interpreting information and communicating their own ideas. Such integrated tasks are particularly valuable because they reflect the complexity of real-world professional communication.

Therefore, the educational potential of artificial intelligence extends beyond individual language exercises. When carefully integrated into the curriculum, AI can help create interconnected learning experiences in which students read, listen, speak, and write in meaningful contexts while simultaneously developing critical thinking and digital intelligence. The most productive approach is not to allow technology to perform linguistic tasks on behalf of learners, but to use it to create additional

opportunities for learners to perform these tasks themselves. In this model, AI functions as a flexible learning environment that can provide input, stimulate interaction, generate challenges, and offer preliminary feedback, while the teacher remains responsible for pedagogical direction and the student remains responsible for learning, interpretation, and final communication *(Bowen, 2024).*

Another important advantage of AI-supported English language education is its potential to increase learner engagement and motivation by making language practice more relevant, interactive, and connected with students' personal and professional interests. Motivation is particularly important in higher education, where students may perceive English as an additional subject rather than an essential component of their future professional development. AI can help change this perception by allowing learners to work with topics that are directly connected with their academic disciplines, career aspirations, hobbies, and everyday digital experiences. For example, a student interested in artificial intelligence can practice English by discussing the advantages and limitations of autonomous systems, while a student interested in business can simulate negotiations with an international client. A student studying engineering can ask an AI system to create a realistic technical problem that requires explanation and discussion in English. Such personalization can make language learning more meaningful because students can immediately see the connection between English proficiency and the situations in which they may use the language outside the classroom.

AI can also contribute to the development of personalized learning pathways. In a traditional course, students generally follow the same sequence of topics, complete similar assignments, and work within the same time limits. Although teachers can differentiate activities to some extent, it is difficult to provide every learner with a completely individual learning programme. AI technologies can support a more flexible model in which students receive additional practice based on their particular difficulties. For instance, one student may need intensive practice with verb tenses, another may need to expand academic vocabulary, while a third may

need to improve fluency and pronunciation. Instead of assigning the same additional exercise to the entire group, a teacher can organize individualized AI-supported tasks for different students. This approach can be particularly useful in university groups where differences in English proficiency may be considerable.

An interesting example is the creation of an individual "English learning profile." At the beginning of a course, students can complete several diagnostic tasks involving vocabulary, grammar, reading, writing, and speaking. Based on the results, the teacher can identify several areas for development. AI can then be used to generate additional practice activities corresponding to these areas. A student who demonstrates strong grammatical knowledge but limited vocabulary, for example, might receive tasks focused on collocations, paraphrasing, and contextual vocabulary. Another student with good vocabulary but weak speaking fluency might receive a sequence of short conversational simulations. At regular intervals, students can repeat selected diagnostic activities and reflect on their progress. Such a model encourages learners to understand that effective language learning is not simply about receiving a final grade but about identifying specific competencies and gradually improving them.

The use of AI can also make reflection a more regular part of the learning process. Students can be asked to maintain digital learning journals in which they record their goals, difficulties, successful strategies, and observations about their interaction with AI. After completing an activity, a student might answer questions such as: "What new language did I learn?", "Which AI suggestion was useful?", "Which suggestion did I reject and why?", "What mistake did I make repeatedly?", and "What will I focus on next time?" Such reflection encourages metacognitive awareness and helps students recognize their own learning patterns. It also prevents AI from becoming an invisible assistant that simply provides answers. Instead, students become conscious participants who analyze how technological support affects their learning.

Gamification provides another opportunity for increasing engagement. AI can be incorporated into language-learning challenges in which students solve problems, complete missions, or respond to unexpected situations. For example, a teacher can organize a “Digital Escape Room” in English in which students have to solve a series of professional or linguistic puzzles. They may first decode a message, then identify a technical problem in a short text, use specialized vocabulary to describe the problem, and finally communicate the solution to an AI-generated character. Each completed task provides information needed to solve the next stage. Such activities can combine vocabulary, grammar, reading comprehension, speaking, and problem-solving while creating a more dynamic learning experience. The educational value of gamified AI activities lies not simply in entertainment but in the opportunity to create meaningful reasons for students to use English.

Another engaging approach is the use of role-based AI simulations. Students can be assigned professional identities and asked to interact with an AI system representing another participant in a realistic situation. For example, one student may act as a software developer presenting a new application, while the AI acts as a skeptical investor. The student must explain the product, respond to difficult questions, defend the proposed solution, and negotiate the conditions of cooperation. In another scenario, a student may act as a university researcher presenting preliminary results while the AI plays the role of a conference participant who asks for clarification. These simulations allow learners to practice professional discourse without the need to reproduce an entire real-world environment. They can also be repeated several times, with students modifying their strategies after each attempt.

The possibility of repetition is particularly valuable for students who experience anxiety when speaking a foreign language. In a traditional classroom, students may have only one opportunity to perform a particular speaking task, and mistakes made during that performance can affect their confidence. AI-supported simulations allow learners to repeat the same scenario, change their answers, and gradually improve their performance. A student preparing for a job interview, for

example, can complete the simulation several times, focusing on different aspects of performance each time. During the first attempt, the main goal may be fluency; during the second, vocabulary precision; and during the third, the organization and persuasiveness of answers. This makes speaking practice a process of experimentation and improvement rather than a one-time performance.

AI can also support collaborative learning rather than exclusively individual learning. Although AI is often associated with personalized interaction between one student and a digital system, teachers can design activities in which groups of students jointly evaluate, correct, or improve AI-generated material. For example, a group can receive three different AI-generated introductions to the same academic topic. Students must discuss which introduction is most effective, identify strengths and weaknesses, and create a fourth version by combining the most successful elements. Each group then presents its decision and explains its reasoning. This type of activity develops communication, negotiation, critical thinking, and collaborative decision-making while making AI-generated content an object of collective analysis.

A further possibility is to use AI to create multiple perspectives on the same topic. Students can ask an AI system to present an issue from different professional or social viewpoints and then compare the resulting arguments. For example, when discussing the introduction of AI into universities, students may examine the perspectives of a student, teacher, university administrator, employer, and technology developer. They can identify differences in priorities and vocabulary and then conduct a structured discussion in which each participant defends one perspective. This activity develops not only English communication skills but also the ability to understand and articulate different positions. It encourages students to recognize that complex issues rarely have a single simple answer.

At the same time, personalization through AI should be approached carefully. A system may provide highly individualized content, but this does not necessarily mean that the content is pedagogically appropriate. Students may also become dependent on continuous technological assistance and lose the ability to work

effectively without it. For this reason, AI-supported learning should include activities in which students deliberately work without technological assistance. For example, after completing an AI-supported vocabulary activity, students can be asked to perform a similar task independently. After practicing an oral presentation with AI feedback, they can deliver the presentation without consulting digital prompts. Such alternation between technology-supported and technology-free activities can help ensure that digital tools strengthen rather than replace students' independent abilities.

The same principle applies to the development of creativity. Although AI can generate numerous ideas quickly, students should not simply select the first acceptable suggestion. They can be challenged to go beyond AI-generated ideas by creating something the system did not provide. For example, after asking AI to generate possible titles for a research project, students can create three original titles based on their own understanding of the topic and explain why they consider them more effective. In a creative writing activity, AI can generate the beginning of a story, while students must develop an unexpected ending. In a professional communication task, AI can suggest several standard solutions to a problem, while students must propose an alternative solution that is more innovative or appropriate to a specific context. Such activities position AI as a starting point for creativity rather than its final source.

The combination of personalization, interaction, reflection, and creativity suggests that AI can contribute to a more student-centred model of English language education. However, student-centred learning does not mean technology-centred learning. The central focus should remain the learner's linguistic, cognitive, social, and professional development. AI is valuable when it helps create conditions in which students communicate more, practice more, reflect more, and take greater responsibility for their learning. It becomes problematic when students use it primarily to avoid these activities. The distinction between these two approaches is therefore essential for the successful integration of artificial intelligence into English language education.

Ultimately, the effectiveness of AI-supported learning depends on the educational culture surrounding its use. Students need clear expectations, teachers need appropriate methodological preparation, and institutions need coherent principles concerning academic integrity, data protection, assessment, and responsible technology use. When these conditions are established, AI can become part of a broader ecosystem of English language learning in which digital technologies support communication, personalization, experimentation, and reflection. The goal is not to create a learning environment in which every activity is mediated by artificial intelligence, but to develop learners who can consciously move between digital and human forms of learning and select the most appropriate resource for a particular task. Such learners are better prepared for an academic and professional world in which English communication and intelligent digital technologies are increasingly interconnected.

The growing integration of artificial intelligence into professional environments also makes it necessary to reconsider the relationship between English language competence and employability. In many professional fields, specialists are increasingly expected to communicate in English while simultaneously working with digital platforms, AI-based systems, international databases, and geographically distributed teams. As a result, English proficiency and digital competence can no longer be viewed as completely separate areas of professional preparation. A future engineer may need to describe a technical problem to an AI system in English, evaluate information generated by a digital platform, communicate the results to international colleagues, and prepare a written report based on the collected data. A software developer may participate in an international online meeting, discuss technical requirements, formulate precise prompts for an AI coding assistant, and explain the final solution to a non-technical client. These situations demonstrate that contemporary professional communication increasingly requires the simultaneous use of linguistic, technological, and analytical skills.

This development creates new opportunities for English for Specific Purposes courses at universities. Instead of teaching professional vocabulary separately from digital skills, teachers can design interdisciplinary tasks in which English becomes the medium through which students solve authentic professional problems. For example, students of information technology can be given a simulated cybersecurity incident and asked to analyze the situation, identify relevant terminology, communicate with a fictional client, and prepare a short incident report in English. Students of engineering can work with a technical description of a machine malfunction, discuss possible causes, and prepare recommendations for a foreign partner. Students of economics can analyze a short business case, negotiate a solution, and present their conclusions to an international audience. Such activities demonstrate the practical value of English and help students understand that language competence is an instrument for professional action rather than an isolated academic requirement.

Another promising direction is the development of digital portfolios that document students' progress in both English and digital intelligence. A digital portfolio may contain written assignments, revised texts, recorded presentations, vocabulary development activities, reflections on AI use, examples of source verification, and selected projects completed during a course. Students can also include short explanations of how AI was used in particular tasks and what decisions they made independently. For example, a student may present an initial version of a professional email, an AI-generated feedback report, the student's revised version, and a reflection explaining which recommendations were accepted and why. Such a portfolio provides a more comprehensive picture of development than a single examination because it demonstrates not only the final result but also the process through which the result was achieved.

Digital portfolios can also support self-assessment and long-term learning. At different stages of their studies, students can return to earlier work and identify changes in vocabulary range, grammatical accuracy, fluency, writing organization,

and confidence in professional communication. They can establish new objectives based on their previous performance and use AI selectively to support these objectives. This creates a continuous cycle of goal setting, practice, feedback, reflection, and improvement. Importantly, students learn to evaluate their own progress rather than depending exclusively on grades assigned by teachers. In this respect, AI can become one element of a broader system of formative assessment and learner autonomy.

The integration of AI also creates possibilities for international and intercultural collaboration. Students from different countries can work together on shared projects using English as a lingua franca while employing AI tools to support communication, brainstorming, translation, or information organization. For example, an international student team might develop a proposal for a digital solution to an environmental problem. Participants can use English to discuss their ideas, negotiate responsibilities, prepare documents, and present their final project. AI can help participants clarify difficult expressions or compare alternative formulations, but the central communicative process remains human. Such projects can help students develop the ability to communicate with people who have different linguistic and cultural backgrounds, an increasingly important competence in international academic and professional environments.

At the same time, the use of AI in multilingual and multicultural settings requires careful attention to linguistic diversity. AI systems may sometimes favor dominant varieties of English or produce expressions that are technically correct but culturally inappropriate. Students should therefore be encouraged to recognize the diversity of contemporary English and understand that effective international communication does not necessarily require imitation of a single native-speaker model. Activities can focus on comparing different varieties of English, analyzing communication strategies, and discussing how meaning is negotiated between speakers with different linguistic backgrounds. This perspective is particularly

relevant to university students who are likely to use English internationally with other non-native speakers rather than exclusively with native speakers.

Another important area is the development of students' ability to formulate precise professional questions. In traditional language teaching, students are often encouraged to answer questions prepared by the teacher. In an AI-mediated environment, the ability to ask effective questions becomes equally important. A poorly formulated request may result in a vague or irrelevant response, whereas a precise question can produce more useful information. Students can therefore be taught to identify the purpose of a request, specify the required context, define the expected format, and indicate the desired level of detail. This skill has direct relevance to professional communication because specialists constantly need to formulate precise questions for colleagues, clients, databases, search engines, and digital systems.

For example, instead of asking an AI system, "Tell me about cybersecurity," a student might formulate a more purposeful request: "Explain three common cybersecurity threats affecting small businesses, provide one realistic example for each, and use B2-level English suitable for a university presentation." Students can then analyze why the second request is more effective and how its structure influences the resulting answer. They can experiment with modifying the audience, purpose, length, terminology, or level of complexity. Through such activities, English language learning becomes directly connected with the development of digital communication competence.

The ability to communicate effectively with AI can also reinforce general communication skills. When students learn to formulate precise prompts, they practice defining concepts, establishing relationships between ideas, specifying constraints, and anticipating possible misunderstandings. These are also essential skills in human communication. A person who can clearly explain to an AI system what information is needed may also become more aware of how to formulate questions and instructions for other people. Therefore, prompt literacy can be viewed

not simply as a technological skill but as an extension of communicative competence in a digital environment.

The increasing use of AI also requires universities to reconsider the concept of digital competence as part of graduate employability. Future professionals will need to know not only how to use digital technologies but also how to collaborate with them responsibly. This includes understanding their limitations, recognizing situations in which human expertise is indispensable, protecting information, evaluating sources, and communicating transparently about the use of AI. English language courses can contribute to this process because many digital tools, professional resources, and international communication environments operate predominantly in English. Developing English competence alongside digital intelligence can therefore provide students with access to a wider range of professional information and opportunities.

An important pedagogical principle emerging from these developments is the need to maintain a balance between technological assistance and productive difficulty. Learning requires students to encounter challenges that encourage them to retrieve information, formulate ideas, make mistakes, revise their responses, and develop strategies for solving problems. If AI removes every difficulty immediately, students may complete tasks more quickly but learn less from the process. Teachers should therefore design activities in which AI provides support without eliminating the cognitive challenge. For example, students may first attempt to solve a problem independently, then use AI to obtain an alternative explanation, and finally compare both solutions. This sequence ensures that technology supports reflection rather than replacing the initial thinking process.

The same principle can be applied to translation activities. Students can first translate a short professional passage independently, then compare their version with an AI-generated translation, identify differences, and discuss which version better conveys the original meaning. They can pay attention to terminology, word order, collocations, register, and cultural references. The final task can require them to

produce a revised translation that combines the strengths of both versions. Such an approach transforms machine translation from a shortcut into a learning resource and encourages students to understand the decisions involved in professional translation.

Therefore, the future of English language education in the AI era is likely to depend increasingly on the ability of educational institutions to combine technological innovation with pedagogical purpose. AI can provide unprecedented access to individualized practice, professional simulations, multilingual resources, and immediate feedback, but these advantages become educationally meaningful only when they are integrated into carefully designed learning experiences. The central task is to prepare students not for a world in which technology simply provides answers, but for a world in which they must continuously interact with intelligent systems, evaluate digital information, communicate across linguistic and cultural boundaries, and make responsible decisions. English language education can play an important role in this process by becoming a space where linguistic competence, digital intelligence, critical thinking, creativity, and professional communication are developed together. Such an integrated model responds to the changing demands of higher education and prepares learners to use both language and technology as instruments for lifelong learning and professional development *(Bowen, 2024).*

An important aspect of rethinking English language education in the AI era is the development of students' ability to communicate effectively with both humans and intelligent digital systems. In contemporary academic and professional environments, communication increasingly involves interaction with digital assistants, automated translation systems, recommendation algorithms, and AI-supported platforms. Consequently, English language competence can no longer be understood exclusively as the ability to produce grammatically correct sentences or participate in traditional face-to-face conversations. Students also need to understand how digital systems process language, how instructions influence AI-generated responses, and how to formulate precise and contextually appropriate requests. This creates a new dimension of language learning in which linguistic accuracy and digital

interaction become closely interconnected. For example, students studying information technology can be asked to formulate a technical request for an AI system, analyse the generated response, identify ambiguous or inaccurate information, and then reformulate the original request to obtain a more relevant result. Such an activity simultaneously develops professional vocabulary, grammatical accuracy, reading comprehension, critical thinking, and prompt formulation skills.

Another promising direction is the use of AI to create realistic professional communication environments that are difficult to reproduce consistently in a traditional classroom. Students can interact with simulated clients, colleagues, managers, researchers, engineers, or international partners and respond to changing communicative situations. A student preparing for a career in engineering, for instance, may participate in a simulated discussion about a technical problem in which the digital interlocutor asks for clarification, challenges a proposed solution, or introduces an unexpected constraint. The student must therefore react spontaneously rather than reproduce a memorized dialogue. Similar scenarios can be developed for business negotiations, academic presentations, project meetings, customer support, scientific discussions, and job interviews. The educational value of such simulations lies not simply in their technological novelty but in their capacity to create repeated opportunities for meaningful communication, experimentation, and reflection.

AI technologies can also support the development of metacognitive skills by helping students analyse their own learning behaviour. After completing a speaking or writing task, learners can compare their initial performance with a revised version, identify recurring language problems, and formulate personal learning goals. Instead of receiving a simple correction, students can be encouraged to classify their mistakes into grammatical, lexical, stylistic, pragmatic, and organizational categories. They can then determine which problems require further practice and which improvements result from successful revision. In this way, AI becomes part of a reflective learning

cycle rather than merely an automatic correction mechanism. The student remains responsible for interpreting feedback and deciding how it should be used.

The integration of AI also creates opportunities for developing creativity in English language education. Generative systems can provide starting points for stories, professional scenarios, debates, problem-solving tasks, visual descriptions, and hypothetical situations, while students are required to transform, challenge, or extend the generated material. For example, an AI-generated description of a future smart city can become the basis for a group project in which students identify technological advantages and potential social problems, prepare arguments from different perspectives, and present their own vision of urban development. In another activity, students can receive an intentionally imperfect professional email generated by an AI system and improve its tone, clarity, politeness, and cultural appropriateness. Such tasks shift the focus from passive consumption of generated content to active transformation and evaluation.

A further consideration concerns the balance between technological assistance and the development of independent language production. If AI is used to complete every stage of a task, students may have fewer opportunities to experience productive struggle, formulate ideas independently, and develop confidence in their own linguistic resources. Therefore, effective methodology should distinguish between stages in which AI assistance is permitted and stages in which students are expected to work independently. A writing assignment, for example, may begin with individual brainstorming, continue with a draft written without AI assistance, and only then involve AI-supported feedback and revision. The final stage can require students to explain which AI suggestions they accepted, rejected, or modified and why. This approach preserves learner agency while still taking advantage of technological support.

Conclusions. The development of artificial intelligence and digital technologies is significantly transforming the approaches to English language education in higher education. The analysis presented in this study demonstrates that

AI tools can provide new opportunities for improving the quality, flexibility, and accessibility of language learning. Generative AI, intelligent learning platforms, machine translation, digital communication tools, and interactive simulations can support the development of reading, listening, speaking, and writing skills and create more individualized learning experiences.

The study has shown that one of the most important advantages of AI integration is the possibility of adapting learning activities to students' individual needs, professional interests, and levels of language competence. AI can provide additional practice, generate professional communication situations, support writing and revision, and offer immediate feedback. Such opportunities are particularly valuable in English for Specific Purposes, where students need to develop both general language competence and communication skills relevant to their future professional activities.

At the same time, the effective use of AI requires appropriate pedagogical guidance. Automatically generated information may contain factual, linguistic, or contextual inaccuracies, while excessive dependence on digital tools can reduce students' independence and affect academic integrity. Therefore, students should be taught to critically evaluate AI-generated content, verify information, protect personal data, and use digital technologies responsibly. The teacher remains an important participant in this process, responsible for selecting appropriate tools, designing meaningful tasks, monitoring learning outcomes, and supporting students' independent thinking.

The findings also indicate that modern English language education should move beyond the traditional understanding of digital competence. Students need not only to use digital tools but also to communicate effectively with intelligent systems, formulate precise requests, analyse generated information, make informed decisions, and reflect on the results of their interaction with technology. These abilities constitute an important component of digital intelligence and are increasingly relevant to academic and professional communication.

Consequently, AI should be regarded as a complementary educational instrument rather than a replacement for the teacher or the learner's own intellectual activity. Its educational value depends primarily on how thoughtfully it is integrated into the learning process. A balanced combination of AI-supported activities, independent language practice, collaborative work, critical analysis, and teacher-guided learning can contribute to the development of students' linguistic, digital, communicative, and professional competences. Thus, rethinking English language education in the AI era involves not simply introducing new technologies, but creating a more flexible, critical, student-centred, and digitally oriented model of language learning that prepares students for lifelong learning and effective participation in the contemporary academic and professional environment.

References:

Bowen J. A., Watson C. E. (2024) Teaching with AI: A Practical Guide to a New Era of Human Learning. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 270 p. https://doi.org/10.56021/9781421449227.

Frankish K., Ramsey W. M. (eds.) (2014) The Cambridge Handbook of Artificial Intelligence. Cambridge: Cambridge University Press, 368 p. https://doi.org/10.1017/CBO9781139046855.

Holmes W., Porayska-Pomsta K. (eds.) (2023) The Ethics of Artificial Intelligence in Education: Practices, Challenges, and Debates. New York: Routledge, 288 p. https://doi.org/10.4324/9780429329067 .

Ilic P., Casebourne I., Wegerif R. (eds.) (2024) Artificial Intelligence in Education: The Intersection of Technology and Pedagogy. Cham: Springer, 315 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71232-6 .

Narciso P. (2024) Generative AI in Education: A Guide for Parents and Teachers. Berkeley, CA: Apress, 170 p. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0844-9 .

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-446
UDC 57:606:629.78

CHAPTER 13.
FROM LABORATORY TO ORBIT: A REVIEW OF KEY DIRECTIONS IN SPACE BIOTECHNOLOGY

Zhanna OSTAPENKO
PhD, Senior lecturer
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Department of Biotechnics and engineering,
(37 Beresteiskyi Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine)
zhanna.ost@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-0949-9912

Viktorij MEL'NICK
Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Department of Biotechnics and engineering,
(37 Beresteiskyi Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine)
melnick.viktorij@lll.kpi.ua
https://orcid.org/0000-0002-0004-7218

Abstract. This work summarises and systematises recent international scientific literature on space biotechnology – an interdisciplinary field examining how spaceflight conditions, chiefly microgravity alongside cosmic radiation and isolation, affect biological systems of varying complexity, and what practical applications this holds for medicine, pharmaceutics, agriculture, and biomanufacturing. The analysis draws on peer-reviewed articles, reviews, and official communications from major space agencies published between 2013 and 2026, covering protein crystallisation, stem cell behaviour, tissue engineering, 3D bioprinting, space microbiology, plant cultivation, and cryopreservation of biological material. Sources were retrieved from PubMed, ScienceDirect, Scopus, and Google Scholar, then systematised, compared, and synthesised. The findings show that microgravity yields larger, more structurally uniform protein crystals, alters stem cell proliferation and metabolism, enables scaffold-free 3D bioprinting of human tissue, substantially changes the physiology of microorganisms and plants, and opens new avenues for the long-term frozen storage of cells, tissues, and organs. Space biotechnology is shown to be shifting gradually from exploratory research toward commercially driven manufacturing, though this shift remains constrained by limited access to orbital infrastructure, high experimental costs, and the lack of unified safety protocols. These conclusions may benefit researchers and practitioners in biotechnology, pharmaceutics, plant science, and regenerative medicine seeking to advance space biofabrication further.

Keywords: biotechnology, protein crystallization, 3D bioprinting, space microbiology, plant science, cryopreservation, biomanufacturing

ВІД ЛАБОРАТОРІЇ ДО ОРБІТИ: ОГЛЯД КЛЮЧОВИХ НАПРЯМІВ КОСМІЧНОЇ БІОТЕХНОЛОГІЇ

Анотація. Ця робота присвячена узагальненню й систематизації сучасної закордонної наукової літератури з космічної біотехнології — міждисциплінарної галузі, яка досліджує, як умови космічного польоту (передусім мікрогравітація, а також космічна радіація та ізоляція) впливають на біологічні системи різної складності, і які практичні перспективи відкриває це для медицини, фармацевтики, сільського господарства та біовиробництва. У роботі проаналізовано рецензовані статті, огляди та офіційні матеріали провідних космічних агентств, опубліковані в міжнародних наукових виданнях протягом 2013-2026 рр. і присвячені кристалізації білків, поведінці стовбурових клітин, тканинній інженерії, 3D-біодруку, космічній мікробіології, культивуванню рослин та кріоконсервації біологічних об'єктів. Пошук джерел здійснювався в базах PubMed, ScienceDirect, Scopus і Google Scholar; отримані дані систематизовано, зіставлено та узагальнено. Встановлено, що мікрогравітація сприяє формуванню більших і структурно однорідніших білкових кристалів, змінює проліферацію та метаболізм стовбурових клітин, робить можливим безкаркасний 3D-друк тканин людини, істотно змінює фізіологію мікроорганізмів і рослин, а також відкриває нові підходи до довгострокового зберігання клітин, тканин і органів у замороженому стані. Показано, що космічна біотехнологія поступово еволюціонує від пошукових досліджень до комерційно орієнтованого виробництва, хоча цьому процесу досі заважають обмежений доступ до орбітальної інфраструктури, висока вартість експериментів і відсутність єдиних протоколів безпеки. Отримані узагальнення можуть бути корисними дослідникам і практикам у галузях біотехнології, фармацевтики, рослинництва та регенеративної медицини для подальшого розвитку напрямів космічної біофабрикації.

Ключові слова: біотехнологія, кристалізація білків, 3D-біодрук, космічна мікробіологія, рослинництво, кріоконсервація, біовиробництво

Abstract. This work summarises and systematises recent international scientific literature on space biotechnology – an interdisciplinary field examining how spaceflight conditions, chiefly microgravity alongside cosmic radiation and isolation, affect biological systems of varying complexity, and what practical applications this holds for medicine, pharmaceutics, agriculture, and biomanufacturing. The analysis draws on peer-reviewed articles, reviews, and official communications from major space agencies published between 2013 and 2026, covering protein crystallisation, stem cell behaviour, tissue engineering, 3D bioprinting, space microbiology, plant cultivation, and cryopreservation of biological

material. Sources were retrieved from PubMed, ScienceDirect, Scopus, and Google Scholar, then systematised, compared, and synthesised. The findings show that microgravity yields larger, more structurally uniform protein crystals, alters stem cell proliferation and metabolism, enables scaffold-free 3D bioprinting of human tissue, substantially changes the physiology of microorganisms and plants, and opens new avenues for the long-term frozen storage of cells, tissues, and organs. Space biotechnology is shown to be shifting gradually from exploratory research toward commercially driven manufacturing, though this shift remains constrained by limited access to orbital infrastructure, high experimental costs, and the lack of unified safety protocols. These conclusions may benefit researchers and practitioners in biotechnology, pharmaceutics, plant science, and regenerative medicine seeking to advance space biofabrication further.

Keywords: biotechnology, protein crystallization, 3D bioprinting, space microbiology, plant science, cryopreservation, biomanufacturing

Вступ. Одним із визначних досягнень сучасної генетики та мікробіології є формування біотехнології – промислового способу отримання біологічних об'єктів на основі керованого метаболізму живих організмів. Біотехнологія виникла на перетині мікробіології, молекулярної біології, генної інженерії, імунології та хімічної технології, а її розвиток був зумовлений потребою суспільства в нових, дешевших продуктах для сільського господарства, медицини, ветеринарії, а також у принципово нових технологічних рішеннях. Якісний перехід від емпіричного до наукового етапу розвитку галузі відбувся в XIX ст., а подальший її розвиток був зумовлений низкою фундаментальних відкриттів – від структури ДНК до отримання рекомбінантних організмів, здатних синтезувати невластиві їм продукти *(Buchholz K., Collins J., 2013).*

Особливий інтерес становить поширення біотехнологічних методів на космічну галузь, де специфічні умови мікрогравітації створюють як істотні технологічні труднощі, так і унікальні переваги. Космічна біотехнологія – міждисциплінарний напрям, що вивчає вплив умов космічного польоту на біологічні системи різного рівня складності, від окремих молекул і клітин до тканин, мікроорганізмів, рослин і цілих організмів, а також можливості практичного використання цих умов для потреб медицини, фармацевтики та

біовиробництва. За останні три десятиліття, завдяки тривалій експлуатації орбітальних станцій, ця галузь перетворилася із суто наукового експерименту на напрям із виразним прикладним і комерційним потенціалом.

Метою цього огляду є систематизація закордонних наукових публікацій, які об’єднують космічні дослідження та біотехнологію: кристалізації білків і фармацевтичному виробництву в мікрогравітації, поведінці стовбурових клітин та тканинній інженерії, 3D-біодруку й адитивним технологіям, мікробіологічним дослідженням, вирощуванню рослин у космічних оранжереях, а також кріоконсервації біологічних об'єктів і органів як суміжному напряму, що набуває значення для медичного забезпечення тривалих космічних місій. Матеріал огляду структуровано за п'ятьма тематичними блоками, кожен з яких розкриває окремий напрям космічної біотехнології на основі найновіших закордонних публікацій.

1. Огляд напрямів досліджень у космічній біотехнології.

Одним із найдавніших і найкраще документованих напрямів космічної біотехнології є вирощування кристалів білків в умовах мікрогравітації. У класичному огляді «Microgravity protein crystallization» *(McPherson A., DeLucas L. J., 2015)* детально проаналізовано понад тридцятирічну історію експериментів із кристалізації білків на борту космічних апаратів: від перших дослідів на човниках Space Shuttle до систематичних програм на орбітальній станції. Автори показують, що в умовах мікрогравітації сповільнюється конвективний перенос речовини до поверхні кристала, що дозволяє отримувати більші, структурно однорідніші кристали з меншою кількістю дефектів порівняно із земними аналогами.

Подібні висновки підтверджуються і в роботі авторів M. Yamada, K. Kihira, S. Takahashi, K. Inaka, H. Tanaka та I. Yoshizaki у виданні Handbook of Space Pharmaceuticals, де систематизовано досвід кристалізації мембранних білків на орбіті та показано практичний внесок цих досліджень у розробку лікарських засобів, зокрема сполук для терапії м'язової дистрофії Дюшенна

(Yamada M., Kihira K., Iwata M., Takahashi S., Inaka K., Tanaka H., Yoshizaki I., 2021). M. Braddock узагальнює шлях від фундаментальних досліджень мішеней до випробувань лікарських препаратів із використанням «мікрогравітаційного асистування», окреслюючи потенціал цієї технології для серцево-судинних, онкологічних та неврологічних захворювань *(Braddock M., 2020)*. Ще одне дослідження систематизує сучасні технічні платформи для кристалізації білків на орбіті й показує, що подібні експерименти стали однією з найчисленніших категорій досліджень на орбітальній станції, що свідчить про перехід кристалізації білків у космосі від суто наукового до комерційно орієнтованого напряму фармацевтичної біотехнології *(Jackson K., Brewer F., Wilkinson A., Williams A., Whiteside B., Wright H., Harper L., Wilson A. M., 2024)*.

Другий важливий напрям досліджень пов'язаний із вивченням поведінки стовбурових клітин у космосі. В одному з сучасних оглядів узагальнено дані про геномні, епігенетичні та механотрансдукційні реакції різних типів стовбурових клітин на реальну й симульовану мікрогравітацію *(Kim S., Min K., Park Y.-G., Moon S.-H., 2026)*. Автори зазначають, що в умовах невагомості стовбурові клітини демонструють прискорену проліферацію, скорочений клітинний цикл та підвищену стійкість до стресу, а після повернення на Землю такі клітини можуть проявляти покращений терапевтичний потенціал, що має значення для регенеративної медицини. Схожі результати описані в роботі, присвяченій інженерії хрящової тканини в умовах космічної мікрогравітації: встановлено, що мікрогравітація спричиняє суттєве збільшення діаметра хондроцитів, підвищення швидкості їхньої проліферації та зростання рівня хондрогенних маркерів *(Jeyaraman M., Ramasubramanian S., Yadav S., Jeyaraman N., 2024)*.

Окремий, тісно пов'язаний зі стовбуровими клітинами напрям – це безпосередній 3D-біодрук тканин на борту орбітальних станцій, детально розглянутий у розділі 4 цього огляду *(Hunsberger J. G., Pandya P., Mulligan M. K., 2025; Rezapour Sarabi M., Yetisen A. K., Tasoglu S., 2023)*. Значний масив

закордонних публікацій присвячено вивченню поведінки мікроорганізмів у космосі: узагальнено дані про вплив мікрогравітації на формування бактеріальних біоплівок, розвиток стійкості до антибіотиків, зміну вірулентності та стійкості до дії макрофагів *(Lin K., Ma J., Ji X., Xu K., Zhang L., Huang Y., 2025).* Автори підкреслюють, що подібні дослідження мають подвійне значення, так як вони допомагають зрозуміти механізми виникнення антибіотикорезистентності на Землі й водночас дозволяють оцінити ризики для здоров'я екіпажів під час тривалих космічних місій.

Значна частина закордонної літератури присвячена вивченню фізіологічних реакцій рослинних і репродуктивних систем на умови космічного польоту (докладно розглянуто в розділі 3) *(Vandenbrink J. P., Kiss J. Z., 2016).* Систематичний огляд впливу мікрогравітації на репродуктивні системи ссавців узагальнює дані про порушення гаметогенезу, запліднення та розвитку ембріона під впливом мікрогравітації та космічної радіації, показуючи, що ключовими механізмами негативного впливу є оксидативний стрес, пошкодження ДНК, мітохондріальна дисфункція та епігенетичні зміни *(Lung C.-F., Lu H.-H., Chung C.-Y., Lin P.-T., Hsu Y.-C., 2026).* Комплексний огляд «Biological Experiments in Space: From Microgravity to Molecular Insights» узагальнює вплив мікрогравітації на фізіологію людини, рослин, мікроорганізмів і гризунів, формуючи цілісну картину багаторівневих біологічних експериментів у космосі *(Malakar V., Kuppusamy G., Vassilieva G. Y., 2026)*. Загальний огляд програми NASA з мікрогравітаційної біотехнології також підтверджує ці тенденції на прикладі кристалізації макромолекул, культивування клітин і досліджень генної експресії *(DeLucas L. J., Bula R. J., Hammond T., Pellis N. R., 2000).*

2. Космічне фармацевтичне виробництво.

2.1. Фізичні основи космічної кристалізації білків.

В основі інтересу до космічного виробництва біофармацевтичних препаратів лежить кілька фізичних ефектів, які виникають в умовах

мікрогравітації. Як показують A. McPherson та L. J. DeLucas, в умовах мікрогравітації зникає конвекція, спричинена різницею густини нагрітих і холодних шарів рідини, а саме конвекція на Землі є одним із головних джерел дефектів під час росту кристалів *(McPherson A., DeLucas L. J., 2015)*. Крім того, зникає седиментація – осідання важчих частинок під дією сили тяжіння, яке на Землі порушує рівномірність розподілу речовини в розчині, а рідини набувають сферичної форми під дією поверхневого натягу і не потребують стінок ємності для утримання форми. Сукупність цих ефектів означає, що кристали білків та інших складних молекул, вирощені в космосі, часто виходять більшими, однорідніші за розміром і мають менше дефектів кристалічної решітки, ніж їхні земні аналоги *(McPherson A., DeLucas L. J., 2015; Jackson K., Brewer F., Wilkinson A., Williams A., Whiteside B., Wright H., Harper L., Wilson A. M., 2024).* Оскільки тривимірна структура білкової молекули часто визначає ефективність і стабільність лікарського препарату, отримання якісніших кристалів безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту *(Yamada M., Kihira K., Iwata M., Takahashi S., Inaka K., Tanaka H., Yoshizaki I., 2021).*

2.2. Кристалізація білків: від фундаментальних досліджень до комерційних результатів.

Найбільш детально документованим прикладом застосування космічної кристалізації у фармацевтичній промисловості є дослідження компанії Merck & Co. Дослідницька команда провела експерименти з кристалізації моноклонального антитіла пембролізумабу (діюча речовина протипухлинного препарату Keytruda®) на борту орбітальної платформи Національної лабораторії США в рамках вантажної місії SpaceX. Автори показали, що умови мікрогравітації дозволили отримати однорідну кристалічну суспензію із середнім розміром частинок близько 39 мкм, тоді як контрольний наземний зразок мав неоднорідний бімодальний розподіл частинок розміром 13 і 102 мкм. Космічні кристалічні суспензії виявилися менш в'язкими і осідали рівномірніше, ніж наземні аналоги. Отримані результати згодом були

відтворені в наземних умовах за допомогою обертових змішувачів і температурних градієнтів, що дозволило виробляти однорідні кристалічні суспензії, придатні для підшкірного введення препарату короткою ін'єкцією замість тривалої внутрішньовенної інфузії, що стало першим повідомленням про космічну кристалізацію повнорозмірного моноклонального антитіла *(Reichert P., Prosise W., Fischmann T. O., Scapin G., Narasimhan C., Spinale A., Polniak R., Yang X., Walsh E., Patel D., Benjamin W., Welch J., Simmons D., Strickland C., 2019)*.

2.3. Автономні орбітальні фармацевтичні фабрики: досвід Varda Space Industries.

Якісно новим етапом комерціалізації галузі стала діяльність американської компанії Varda Space Industries. У червні 2023 року ракета-носій вивела на орбіту її першу безпілотну капсулу W-1 масою менше 90 кг, фактично першу у світі автономну фармацевтичну фабрику, призначену для виробництва ліків в умовах мікрогравітації без екіпажу на борту (*Adams R., 2023)*. Першою метою місії стало вирощування кристалів ритонавіру – противірусного препарату, що застосовується для лікування ВІЛ-інфекції. Капсула здійснювала цикли нагрівання й охолодження речовини, щоб отримати відмінну від земної кристалічну структуру препарату. Компанія залучила щонайменше 145 млн доларів венчурного капіталу до квітня 2024 року, а до середини 2025 року загальний обсяг залучених інвестицій сягнув 329 млн доларів *(Varda Space Industries, 2024)*, що свідчить про суттєвий інтерес приватного капіталу до галузі орбітального біовиробництва.

2.4. Регуляторні аспекти космічного біовиробництва.

Комерціалізація космічного виробництва ліків стикається не лише з технічними, а й із регуляторними труднощами. Коли капсула компанії Varda мала повернутися на Землю в середині 2023 року, Федеральне управління цивільної авіації США (FAA) відхилило запит компанії на видачу ліцензії для повторного входу в атмосферу, а Повітряні сили США відмовили в дозволі на

приземлення на випробувальному полігоні в штаті Юта через невідповідність поданих матеріалів вимогам безпеки *(Business Wire, 2024).* Лише в лютому 2024 року, після кількамісячного очікування, FAA вперше в історії видала комерційній компанії ліцензію на повторний вхід космічного апарата в атмосферу за новими правилами Part 450, що дозволило капсулі здійснити приземлення *(Foust J., 2024)*. Ця історія є важливим застереженням для всієї галузі: технологічна готовність космічної фармацевтичної фабрики не гарантує швидкого й безперешкодного отримання готового продукту, оскільки процес повернення матеріалу на Землю регулюється тими самими органами авіаційного нагляду, що й будь-який інший літальний об'єкт.

2.5. Перспективи та критичні оцінки галузі.

Прибічники космічного виробництва наводять переконливі фізичні аргументи: відсутність гравітації, низькі температури й майже ідеальний вакуум постають у космосі безкоштовно, тоді як на Землі для відтворення подібних умов потрібне складне й енергоємне обладнання *(Adams R., 2023).* Водночас у галузі залишається чимало невирішених питань: регуляторна невизначеність, продемонстрована історією повернення капсули Varda, питання економічної рентабельності в масовому масштабі, оскільки розрахунки попередніх десятиліть стосувалися вузького кола препаратів із дуже високою вартістю одиниці продукції, а також окреме етичне питання рівного доступу до препаратів, отриманих у космосі. Для більшості лікарських засобів масового споживання космічна економіка поки не працює, тож космічне виробництво радше доповнює, а не замінює наземну фармацевтичну промисловість.

Суміжним напрямом використання космічних умов для отримання нових біологічних властивостей є космічний мутагенез насіння сільськогосподарських культур, детально розглянутий у підрозділі 3.8 цього огляду *(Nazarenko V. I., Taranenko V. I., Tkachuk L. I., 2006; IAEA & FAO, 2022).*

3. Космічні оранжереї та вирощування рослин в умовах космічного польоту

3.1. Актуальність вирощування рослин і розвиток космічної біології.

З переходом від коротких орбітальних місій до планів тривалого перебування людини на Місяці й Марсі питання вирощування рослин у космосі набуває дедалі більшої практичної ваги. Що довшою й віддаленішою стає місія, то дорожчим і менш надійним стає регулярне постачання витратних матеріалів із Землі, а отже, зростає потреба у власних, відновлюваних джерелах їжі, кисню та чистої води на борту *(Wolff S. A., Coelho L. H., Karoliussen I., Brinckmann E., Jost A.-I. K., 2014; Herranz R., Anken R., Boonstra J., 2013)*. Це зробило космічну біологію рослин самостійним і активно зростаючим напрямом досліджень. За останні десятиліття дослідження пройшли шлях від поодиноких експериментів із проростанням насіння до розробки спеціалізованого обладнання для повного циклу вирощування рослин та розуміння молекулярних механізмів їхньої адаптації до мікрогравітації.

Для самого ж екіпажу космічного корабля рослини виконують функції, які важко замінити суто технічними засобами. По-перше, вони є потенційним джерелом свіжої їжі та кисню під час тривалих міжпланетних перельотів, коли регулярне постачання з Землі стає неможливим або надто дорогим *(Khodadad C. L. M., Hummerick M. E., Spencer L. E., Dixit A. R., Richards J. T., Romeyn M. W., Smith T. M., Wheeler R. M., Massa G. D., 2020).* По-друге, догляд за рослинами має істотне психологічне значення для екіпажу: можливість піклуватися про живу зелень допомагає легше переносити тривалу ізоляцію та обмежений життєвий простір *(Khodadad C. L. M., Hummerick M. E., Spencer L. E., Dixit A. R., Richards J. T., Romeyn M. W., Smith T. M., Wheeler R. M., Massa G. D., 2020; Wolff S. A., Coelho L. H., Karoliussen I., Brinckmann E., Jost A.-I. K., 2014*). Саме тому вивчення того, як рослини ростуть, розвиваються і плодоносять в умовах мікрогравітації, стало окремим і плідним напрямом космічної біології.

3.2. Фізіологічні основи росту рослин у мікрогравітації: гравітропізм.

Усі земні рослини еволюційно сформувалися в умовах постійного земного тяжіння, а їхня реакція на силу тяжіння (гравітропізм) визначає напрямок росту кореня та стебла. Сприйняття гравітаційного сигналу відбувається у спеціалізованих клітинах – статоцитах, де осідання щільних крохмалевмісних пластид, амілопластів-статолітів, запускає перерозподіл фітогормону ауксину через специфічні білки-переносники родини PIN, що зрештою й спричиняє асиметричний ріст органаю Розглядають також механізм активації механочутливих кальцієвих каналів унаслідок зміни натягу цитоскелета й мембрани під час седиментації статолітів. Умови мікрогравітації в космічному польоті надають унікальну можливість вивчати ці процеси без постійного впливу сили тяжіння. Сучасні методи транскриптоміки й протеоміки показують, що мікрогравітація змінює експресію значної кількості генів, задіяних у відповіді на стрес, кальцієвій сигналізації та синтезі білків клітинної стінки *(Nakamura M., Nishimura T., Morita M. T., 2019).*

3.3. Сучасні космічні оранжереї та спеціалізоване обладнання.

Кілька провідних космічних агентств експлуатують спеціалізоване обладнання для вирощування рослин на орбіті. Американська система Veggie (NASA), що являє собою компактну камера зі світлодіодним освітленням і кореневими «подушками»-субстратом, з 2014 року вирощує салатні культури безпосередньо для споживання екіпажем. Дослідження показали, що вирощений у Veggie салат сорту «Outredgeous» не поступається наземним аналогам за харчовою цінністю та є мікробіологічно безпечним *(Khodadad C. L. M., Hummerick M. E., Spencer L. E., Dixit A. R., Richards J. T., Romeyn M. W., Smith T. M., Wheeler R. M., Massa G. D., 2020)*. Європейська модульна культиваційна система (EMCS), розроблена ESA, обладнана двома центрифугами діаметром 600 мм, здатними відтворювати прискорення від 0,001 до 2g, що дозволяє поєднувати мікрогравітаційні експерименти з бортовим контролем 1g. На цій платформі досліджували гравічутливість і фототропізм

арабідопсису та сочевиці. Продовженням цієї лінії обладнання стала лабораторія BIOLAB, розміщена в європейському орбітальному модулі «Columbus». Японське космічне агентство JAXA використовує власний орбітальний модуль «Kibo» для вивчення клітинної біології рослин у мікрогравітації, а Європейське космічне агентство розробило автономну біологічну лабораторію нового покоління PHENIX, призначену для спостереження за трансгенними рослинами з флуоресцентними маркерами. Важливим технічним викликом для будь-якої орбітальної оранжереї залишається оптимізація освітлення, оскільки електроенергія є одним із найдефіцитніших ресурсів на борту космічного апарата, а світлодіодний світильник є її основним споживачем в оранжереї *(Kittang Jost A.-I., Hoson T., Iversen T.-H., 2015)*.

3.4. Наземні платформи моделювання мікрогравітації.

Оскільки можливості проведення експериментів безпосередньо на орбіті обмежені, дослідники широко застосовують наземні платформи, що моделюють умови зниженої або зміненої гравітації. Ракетні зонди (зокрема європейська програма TEXUS) здатні створювати умови невагомості протягом кількох хвилин вільного падіння. Параболічні польоти спеціально обладнаних літаків дають десятки секунд мікрогравітації в межах одного польоту, а вежі падіння (зокрема в Бремені, Німеччина) – кілька секунд. Для тривалішого моделювання ефектів мікрогравітації на Землі застосовують кліностати різних типів (2D- і 3D-кліностати) та машини випадкових положень (random positioning machine, RPM). Порівняльний аналіз цих платформ, їхніх фізичних принципів і меж застосовності для різних біологічних об'єктів систематизовано у спеціалізованому огляді *(Herranz R., Anken R., Boonstra J., 2013).*

3.5. Проєкт MELiSSA та стратегія замкнених систем життєзабезпечення.

Масштабний міжнародний проєкт Європейського космічного агентства MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative), розпочатий у 1989

році, спрямований на створення замкненої системи життєзабезпечення, що виробляє їжу, воду й кисень з органічних відходів екіпажу за принципом штучної водної екосистеми з кількома взаємопов'язаними компартментами – від анаеробного ферментера до компартменту вищих рослин. У межах підготовки до включення вищих рослин у такі системи розроблено детальну дорожню карту досліджень, що охоплює вплив рівня гравітації, магнітних полів і радіації на ріст і розвиток рослин *(Wolff S. A., Coelho L. H., Karoliussen I., Brinckmann E., Jost A.-I. K., 2014).*

3.6. Український внесок у космічну біологію рослин.

Українські дослідники роблять самостійний внесок у вивчення космічної біології рослин. Засновницею цього напряму в Україні ще у 1970-х роках стала член-кореспондент НАН України Єлизавета Кордюм (Інститут ботаніки імені М. Г. Холодного НАН України), яка десятиліттями досліджує гравічутливість і адаптацію рослинної клітини до умов реальної та змодельованої мікрогравітації, зокрема роль цитоскелета, мембранних мікродоменів і кальцієвої сигналізації у сприйнятті гравітаційного сигналу. Її роботи, опубліковані в провідних міжнародних виданнях з космічної та гравітаційної біології, розглядають можливості й межі повної адаптації рослин до тривалого перебування в умовах мікрогравітації та формулюють завдання для подальших фундаментальних і прикладних досліджень у цій галузі *(Kordyum E. L., 2014).*

3.7. Український експеримент CUE на місії STS-87: вирощування рослин на борту шатла «Колумбія».

Одним із найбільш предметних внесків України у космічне рослинництво став Спільний українсько-американський експеримент (Collaborative Ukrainian Experiment, CUE), виконаний під час місії шатла «Колумбія» STS-87 (19 листопада – 5 грудня 1997 року) космонавтом-дослідником Леонідом Каденюком. Програму з десяти біологічних дослідів розробили спільно фахівці Інституту ботаніки імені М. Г. Холодного НАН України та американських університетів (зокрема Канзаського та Луїзіанського

державних університетів). Мета полягала у вивченні впливу мікрогравітації на проростання, ріст, розвиток, фотосинтез, запилення й запліднення рослин *(NASA, 1997).*

Об'єктами дослідження слугували чотири види: ріпак (Brassica rapa), соя (Glycine max) та два види моху – Ceratodon purpureus і Pottia intermedia. Для вирощування рослин на борту використовували спеціалізовану камеру для вирощування рослин (Plant Growth Facility, PGF), що забезпечувала контрольовані умови освітлення, вологості й газового складу періодом до 30 діб культивування, та контейнери для біологічних досліджень (Biological Research in Canisters, BRIC). Зібраний рослинний матеріал фіксували та заморожували в рідкому азоті для подальшого аналізу на Землі *(NASA, 1997).*

Особливої уваги заслуговує методика ручного запилення ріпаку в умовах невагомості: Л. Каденюк використовував спеціальний інструмент – паличку з прикріпленим черевцем бджоли, що імітувало природний процес перенесення пилку комахою *(RFE/RL, 1997).* Паралельно з орбітальним експериментом реалізовувався освітній проєкт «Вчителі та учні досліджують рослини в космосі» (TSIPS), де десятки тисяч школярів і вчителів в Україні та сотні тисяч у США відтворювали в класах ті самі досліди з ріпаком на спрощених моделях ростового обладнання *(Nazarenko V. I., Taranenko V. I., Tkachuk L. I., 2006).* Найуспішнішим учасникам проєкту випала нагода поставити запитання Л. Каденюку під час прямого телемосту Київ – Х'юстон – борт «Колумбії» *(RFE/RL, 1997).* Вибір ріпаку був невипадковим, тому що цей вид належить до так званих «швидких рослин» (fast plants) із коротким життєвим циклом, спеціально виведених для освітніх і дослідницьких цілей *(NASA, 1997).*

3.8. Насіння в умовах космічного польоту: мутагенез і селекція.

Окремим перспективним напрямом космічної біології рослин є дослідження стійкості насіння до комплексу позаземних факторів та оцінювання можливостей використання космічно індукованої мінливості в селекції. У листопаді 2022 року Об'єднаний центр ядерних технологій у

продовольстві та сільському господарстві ФАО/МАГАТЕ відправив на орбітальну станцію насіння арабідопсису (Arabidopsis thaliana) та сорго (Sorghum bicolor) для вивчення мутацій, спричинених космічною радіацією, мікрогравітацією та екстремальними температурами *(IAEA & FAO, 2022).* Проєкт спирається на майже 60-річний досвід використання радіаційно-індукованого мутагенезу для прискореної селекції сільськогосподарських культур. У межах цієї програми у 70 країнах світу сьогодні використовують понад 3400 мутантних сортів більше 210 видів рослин. Дослідники розраховують встановити, чи здатні умови космічного польоту індукувати мутації, корисні для підвищення стійкості культур до посухи, засолення й підвищених температур в умовах змін клімату на Землі *(IAEA, 2023).*

3.9. Утилізація рослинних відходів у замкнених системах життєзабезпечення: анаеробне зброджування соломи.

Однією з невирішених проблем космічної біології рослин залишається відсутність відпрацьованих технологій переробки рослинних відходів безпосередньо в системі життєзабезпечення. Дослідники Харбінського технологічного інституту (філія в Шеньчжені) та Науково-дослідного центру підготовки космонавтів Китаю вивчили можливість твердофазного анаеробного зброджування соломи пшениці, що є основним компонентом рослинних відходів у замкнених системах життєзабезпечення, для одночасного одержання біогазу та скорочення обсягу відходів. Попередня ферментативна обробка соломи забезпечила значне розкладання лігноцелюлозного комплексу: целюлози – на 37,47 %, геміцелюлози – на 46,96 %, лігніну – на 14,05 %. Подальше твердофазне анаеробне зброджування за співвідношення вуглецю до азоту (C/N), що дорівнює 25, дало ще інтенсивніше розкладання лігноцелюлози (74,20 %) і вихід біогазу на рівні 77,59 л/кг летких твердих речовин за 30 діб зброджування. Аналіз динаміки мікробного угруповання показав домінування типових целюлозоруйнівних бактерій – Firmicutes, Bacteroidetes і Proteobacteria *(Jin X., Ai W., Dong W., 2022)*. Отримані результати безпосередньо доповнюють

концепцію MELiSSA (підрозділ 3.5): якщо європейський проєкт зосереджений передусім на компартменті вищих рослин і замкненому кругообігу газів, води та поживних речовин, то технологія твердофазного анаеробного зброджування пропонує конкретне інженерне рішення для компактної й енергоефективної переробки рослинної біомаси безпосередньо на борту.

3.10. Перспективи харчового забезпечення: їстівні культури й новітні біотехнології.

Окрім наукового значення, космічні оранжереї мають і суто практичну харчову цінність. Вирощені на борту станції салатні культури використовуються екіпажем безпосередньо в їжу, причому за смаковими й нутрієнтними властивостями практично не відрізняються від наземних аналогів *(Khodadad C. L. M., Hummerick M. E., Spencer L. E., Dixit A. R., Richards J. T., Romeyn M. W., Smith T. M., Wheeler R. M., Massa G. D., 2020).* У пошуках альтернативних джерел білка для тривалих місій кілька космічних агентств досліджують технологію культивованого м'яса – вирощування м'язової тканини з клітин тварин у біореакторах поза організмом. У межах програми Discovery Європейське космічне агентство профінансувало дві незалежні дослідницькі команди (німецька компанія yuri та Reutlingen University, британські Kayser Space, Cellular Agriculture і Campden BRI), які оцінили різні методи біореакторного культивування м'язової тканини та дійшли висновку, що ця технологія є перспективним джерелом свіжого білка для довготривалих місій, хоча потребує подальшого доопрацювання *(ESA, 2023).*

3.11. Невирішені проблеми.

Попри всі описані досягнення, використання рослин як повноцінного компонента біорегенеративних систем життєзабезпечення для тривалих міжпланетних перельотів залишається ще далеким від практичного втілення. Ключовими невирішеними проблемами є недостатній обсяг наявних дослідних оранжерей для отримання промислово значущої кількості рослинної продукції, відсутність відпрацьованих технологій регенерації субстрату й переробки

рослинних відходів, а також знижена якість насіння, що формується в умовах мікрогравітації *(Wolff S. A., Coelho L. H., Karoliussen I., Brinckmann E., Jost A.-I. K., 2014; Nakamura M., Nishimura T., Morita M. T., 2019).* Це підіймає питання про потребу окремої генетико-селекційної роботи для отримання сортів сільськогосподарських культур, спеціально адаптованих до рівнів гравітації, нижчих за 1g, зокрема до умов Місяця (1/6 g) і Марса (1/3 g).

4. Біодрук і адитивні технології в космосі.

4.1. Комерційні платформи для біотехнологічних експериментів на орбіті.

Розвиток космічної біотехнології дедалі більше спирається на приватні компанії. У серпні 2023 року компанії Sierra Space та Redwire оголосили про стратегічне партнерство для створення комерційної біотехнологічної платформи, яку розмістять на надувному модулі Large Integrated Flexible Environment (LIFE) – майбутній комерційній космічній станції Sierra Space. Redwire постачає обладнання, раніше відпрацьоване на орбітальній станції, зокрема Advanced Space Experiment Processor (ADSEP) – універсальну платформу для біотехнологічних експериментів, левову частку яких становитиме кристалізація великих молекул для фармацевтичних досліджень структури білків *(Sierra Space, Redwire Corporation, 2023).*

4.2. Біодрук тканин людини в умовах мікрогравітації.

Показовим прикладом практичного застосування космічного біодруку стала робота компанії Redwire з її обладнанням BioFabrication Facility (BFF). У липні 2023 року на борту орбітальної станції вперше в світі надруковано фрагмент людського меніска колінного суглоба. Після 14 діб культивування в ADSEP зразок повернули на Землю на кораблі Crew Dragon для подальшого аналізу. Експеримент виконано спільно з Центром біотехнологій Університету медичних наук для військовослужбовців США (4D Bio³), який шукає вдосконалені методи лікування типових травм меніска. Наступним етапом програми стала спроба друку серцевої тканини – тест здатності клітин зберігати

синхронний ритм скорочення після біодруку складніших багатошарових структур *(Redwire Corporation, 2023).*

4.3. Адитивне виробництво на орбіті: перший 3D-принтер у космосі.

Паралельно з біодруком розвивається й класичне адитивне виробництво позабіологічних об'єктів. У листопаді 2014 року астронавт Баррі «Бутч» Вілмор встановив на орбітальній станції перший у світі 3D-принтер, розроблений компанією Made in Space спільно з Центром космічних польотів імені Маршалла (NASA). Першим надрукованим у космосі об'єктом стала деталь корпусу самого принтера. Це засвідчило принципову можливість виготовляти інструменти та запасні частини безпосередньо на орбіті, що особливо важливо для місій, де регулярне постачання з Землі неможливе. Порівняння надрукованих у космосі й на Землі деталей показало, що мікрогравітація не впливає суттєво на якість адитивного виробництва *(NASA, 2023).*

4.4. Наземні дослідження з біодруку клітин та органоїдів.

Хоча більшість експериментів із друку функціональних людських тканин поки виконують у наземних лабораторіях, їхні результати безпосередньо формують науковий фундамент для космічного біодруку. Дослідники Кембриджського університету (Велика Британія) вперше показали можливість друку зрілих, диференційованих клітин центральної нервової системи. За допомогою п'єзоелектричного струменевого біопринтера було надруковано гангліонарні та гліальні клітини сітківки щура зі швидкістю до 100 клітин за секунду без істотної втрати життєздатності клітин *(Lorber B., Hsiao W.-K., Hutchings I. M., Martin K. R., 2014).* Бразильські дослідники з Центру дослідження геному людини та стовбурових клітин (HUG-CELL) при Університеті Сан-Паулу за допомогою 3D-біодруку отримали функціональні печінкові органоїди («міні-печінки») з клітин крові людини, здатні виробляти білки, накопичувати вітаміни та виділяти жовч *(Goulart E., de Caires-Junior L. C., Telles-Silva K. A., 2019).*

4.5. Мікробіом орбітальної станції: нові види бактерій.

Дослідження мікробіома самої станції також є частиною космічної біотехнології. У 2021 році команда генетиків під керівництвом Університету Південної Каліфорнії та Лабораторії реактивного руху NASA (JPL) за результатами аналізу зразків, зібраних із поверхонь орбітальної станції у 2015-2016 роках, описала новий вид бактерій – Methylobacterium ajmalii. Дослідники припускають, що його геном може містити біотехнологічно корисні детермінанти, здатні сприяти росту рослин у стресових умовах космічного польоту *(Bijlani S., Singh N. K., Eedara V. V. R., Podile A. R., Mason C. E., Wang C. C. C., Venkateswaran K., 2021).*

5. Кріоконсервація біологічних об'єктів і органів для потреб космічної медицини.

Суміжним напрямом космічної біотехнології, що дедалі більше привертає увагу в контексті планування тривалих міжпланетних місій, є кріоконсервація біологічних об'єктів. Європейське космічне агентство в межах дослідження Mission Concept and Requirements Assessment (MicRA) систематично оцінює наукові й інженерні передумови керованого призупинення метаболізму (торпору) екіпажу, як інструменту суттєвого зниження маси корисного навантаження (їжі, води, кисню) для місій до Марса *(Choukér A., Ngo-Anh T. J., Biesbroek R., Heldmaier G., Heppener M., Bereiter-Hahn J., 2021).* Хоча керована гібернація людини та кріоконсервація цілих органів залишаються різними за технологічною зрілістю напрямами, обидва спираються на спільний фундамент – глибоке розуміння механізмів холодового пошкодження клітин і тканин та методів їхнього захисту, що робить огляд сучасного стану кріобіології органічним продовженням цього дослідження.

5.1. Актуальність розвитку технологій кріоконсервації органів.

Глобальна потреба в науково-технологічних проривах для розширення доступу до донорських органів залишається надзвичайно високою. Розвиток технологій тривалого кріозберігання й подальшого відновлення органів мав би

величезну цінність із кількох причин. Перш за все це б дало змогу суттєво продовжити вузьке часове вікно збереження життєздатності органа після вилучення в донора, зняти географічні й часові обмеження при трансплантації, а також відкрило би можливість зберігати органи, вирощені з власних стовбурових клітин пацієнта, замість очікування підхожого донора. Наразі випадки успішної трансплантації кріоконсервованого цілого органа лишаються поодинокими: як правило, після розморожування виживає не орган як єдине ціле, а лише окремі ділянки тканини.

5.2. Механізми кріопошкодження клітин і тканин.

Основними механізмами пошкоджувальної дії холоду на живі клітини є:

- пошкодження клітин кристалами льоду, що утворюються (найзначущіший механізм, для запобігання якому й застосовують кріопротектори);

- оборотний фазовий перехід «рідкий кристал – гель» у фосфоліпідних мембранах, який робить мембрану товщою й крихкішою;

- денатурація білкових молекул унаслідок охолодження, дегідратації та зростання концентрації електролітів *(Elliott G. D., Wang S., Fuller B. J., 2017).*

Традиційні кріопротектори (гліцерин, диметилсульфоксид (ДМСО) та інші проникні речовини) ефективно захищають клітини, тканини (кров, сперму) та ранні ембріони, однак для великих об'єктів, зокрема цілих органів, вони потребують настільки високих концентрацій, що самі стають токсичними *(Elliott G. D., Wang S., Fuller B. J., 2017).*

5.3. Кріопротектори на основі інертних газів.

Ще у 1960-х роках було запропоновано використовувати як кріопротектори хімічно інертні гази, насамперед ксенон, який за температури нижче -1,6 °C утворює з водою клатрат – просторовий каркас із молекул води, у порожнинах якого розташовуються атоми ксенону, що конкурує з утворенням кристалів льоду. Дослідницька група Університету штату Аризона (США) експериментально показала, що протокол кріостазу з використанням ксенону

під тиском забезпечує стабільність мітохондріальних мембран серцевої тканини після глибокої гіпотермії. Електронна мікроскопія підтвердила відсутність набрякання та розриву мітохондрій, характерних для звичайного заморожування *(Sheleg S., Hixon H., Cohen B., Lowry D., Nedzved M., 2008).* Це стало першим прямим доказом мембранопротекторної дії ксенону на клітинному рівні й підставою для подальших досліджень інертних газів як альтернативи традиційним кріопротекторам.

5.4. Глибока зворотна гіпотермія у ссавців.

Технологію глибокої зворотної гіпотермії (asanguineous ultraprofound hypothermia), яка дає змогу тваринам переживати тривалу клінічну смерть унаслідок охолодження з подальшим повним відновленням життєвих функцій, розробила та експериментально випробувала на собаках дослідницька група Інституту Сафара при Університеті Піттсбурга (США). Успішне відновлення тварин після застосування відповідного протоколу охолодження є одним із небагатьох експериментально підтверджених прикладів повністю зворотної глибокої гіпотермії у великих ссавців *(Nozari A., Safar P., Wu X., Stezoski W. S., Henchir J., Kochanek P., Klain M., Radovsky A., Tisherman S. A., 2004).*

5.5. Вітрифікація та «нанозігрівання» органів: сучасний прорив.

Найбільш перспективним напрямом кріозберігання цілих органів сьогодні вважається вітрифікація – надшвидке охолодження органа до склоподібного, позбавленого кристалів льоду стану, у поєднанні з так званим «нанозігріванням». У 2017 році дослідники Університету Міннесоти (США) вперше продемонстрували рівномірне й швидке відігрівання вітрифікованих тканин великого об'єму (до 50 мл) за допомогою магнітних наночастинок заліза, розподілених у кріопротекторному розчині та розігрітих радіочастотним електромагнітним полем. Це дало змогу уникнути розтріскування й повторної кристалізації, характерних для звичайного конвекційного відігрівання *(Manuchehrabadi N., Gao Z., Zhang J., 2017).* У 2023 році та сама група вперше в світі досягла повного успіху на рівні цілого органа. Вітрифіковану нирку щура

зберігали до 100 діб за кріогенної температури, після чого методом нанозігрівання відновили її й успішно трансплантували, повністю відновивши життєво важливу ниркову функцію в реципієнта *(Han Z., Rao J. S., Gangwar L., Namsrai B.-E., Pasek-Allen J. L., Etheridge M. L., Wolf S. M., Pruett T. L., Bischof J. C., Finger E. B., 2023).*

5.6. Гібернація і анабіоз: біологічні механізми.

Перехід від активного стану до гібернації контролюється специфічними генами, яких негібернуючі тварини не мають. Мозкова тканина гібернуючих видів поступово змінює свою мікроструктуру й біохімію, щоб забезпечити стан гібернації. Саме через відсутність потрібного генетичного апарату негібернуючі тварини не здатні входити у стан гібернації навіть за введення відповідних гормонів *(Choukér A., Ngo-Anh T. J., Biesbroek R., Heldmaier G., Heppener M., Bereiter-Hahn J., 2021).* Розуміння цих механізмів залишається окремим і важливим напрямом досліджень, дотичним як до майбутніх технологій керованого призупинення життєдіяльності екіпажу під час тривалих міжпланетних перельотів, так і до розвитку методів банкування донорських органів на Землі.

6. Механізми пошкодження біооб'єктів, що заморожуються у космічному просторі та на модульних космічних станціях.

Заморожування біологічних об'єктів у космічному просторі та на борту орбітальних станцій є одним із найважливіших практичних завдань сучасної космічної біотехнології. З одного боку, глибоке охолодження й кріоконсервація застосовуються цілеспрямовано для довгострокового зберігання клітинних культур, репродуктивних клітин, мікроорганізмів і біологічних зразків під час тривалих космічних місій. З іншого боку, значна частина зовнішньої поверхні орбітальних станцій і модулів постійно перебуває в умовах природного глибокого холоду, космічного вакууму та інтенсивної радіації, що робить питання механізмів пошкодження заморожених біооб'єктів надзвичайно

актуальним не лише для прикладної кріобіології, а й для астробіології та підготовки майбутніх міжпланетних місій.

На відміну від класичної земної кріобіології, де основним пошкоджувальним фактором є сама низька температура і супутнє утворення кристалів льоду, космічне середовище накладає на процес заморожування низку додаткових і специфічних факторів: глибокий вакуум, потужну галактичну космічну радіацію та сонячні космічні промені, невідфільтроване ультрафіолетове випромінювання, різкі періодичні перепади температури (термоциклування), а також мікрогравітацію, яка змінює характер тепло- і масообміну в замороженому зразку. Тому механізми пошкодження заморожених біооб'єктів у космосі не можна розглядати як просте повторення земних кріобіологічних закономірностей. Вони є результатом складної суперпозиції кількох ушкоджувальних чинників, які часто діють синергічно, посилюючи негативний ефект один одного.

6.1. Особливості космічного середовища як чинника кріопошкодження.

Модульні орбітальні станції є складними інженерними об'єктами, окремі частини яких перебувають у принципово різних теплових і радіаційних умовах. Усередині герметичних модулів (наприклад, японського модуля «Kibo») підтримується контрольована температура, а зразки можуть зберігатися в спеціалізованих низькотемпературних морозильних установках типу MELFI (Minus Eighty-Degree Laboratory Freezer for ISS), здатних підтримувати температуру до -95 °C. Водночас на зовнішній стороні станції, на спеціальних експонувальних платформах (Exposure Facility модуля «Kibo», європейська платформа EXPOSE), біологічні зразки виявляються безпосередньо в умовах відкритого космосу.

Ключова відмінність зовнішнього космічного середовища від земних умов заморожування полягає в способі теплообміну. За межами атмосфери єдиним механізмом обміну теплом біооб'єкта з довкіллям, окрім прямого

контакту з елементами конструкції станції, є тепловипромінювання, а конвективний теплообмін у вакуумі повністю відсутній. Для платформи Tanpopo на зовнішній поверхні модуля «Kibo» зафіксовано регулярні температурні цикли в діапазоні приблизно від -120 °C до +45…+50 °C, що повторюються з періодом орбітального обертання станції, приблизно 90 хвилин *(Yamagishi A., Hashimoto H., Yano H., Imai E., Tabata M., Higashide M., Okudaira K., 2021).*

Другим визначальним чинником є глибокий вакуум, який спричиняє майже миттєву й практично повну дегідратацію будь-якого незахищеного біологічного зразка, що суттєво змінює співвідношення внесків льодоутворення й висушування в загальну картину пошкодження клітин.

Третім специфічним чинником є космічна радіація, насамперед галактичні космічні промені та сонячні космічні промені, а також невідфільтроване жорстке ультрафіолетове випромінювання Сонця, інтенсивність якого поза захисним озоновим шаром у сотні й тисячі разів перевищує земний рівень *(Horneck G., Klaus D. M., Mancinelli R. L., 2010).* Важкі частинки галактичних космічних променів спричиняють переважно пряму іонізацію вздовж треку своєї траєкторії, що призводить до утворення локальних кластерів ушкоджень ДНК, так званих щільних (densely clustered) двониткових розривів, які значно гірше репаруються клітинними системами відновлення, ніж розсіяні пошкодження від звичного рентгенівського чи гамма-випромінювання.

Слід також зазначити, що модульна архітектура сучасних космічних станцій створює додаткову просторову неоднорідність теплового та радіаційного середовища. Окремі модулі відрізняються товщиною і матеріалом корпусу, орієнтацією відносно напрямку руху та Сонця, а також ступенем екранування іншими елементами конструкції станції. Через це результати, отримані на одній експонувальній платформі, не завжди можна безпосередньо

використовувати для прогнозування ризиків для біологічних матеріалів в інших частинах станції або на майбутніх космічних кораблях іншої конструкції.

6.2. Мікрогравітація і фізика льодоутворення при заморожуванні в космосі.

Окремої уваги заслуговує вплив мікрогравітації на сам фізичний процес кристалізації льоду, який на Землі істотно залежить від гравітаційної конвекції та седиментації. У наземних умовах градієнт густини між охолодженими й теплішими шарами рідини спричиняє конвективні потоки, що впливають на форму фронту кристалізації та розмір і морфологію утворених кристаликів льоду *(McPherson A., DeLucas L. J., 2015).* В умовах мікрогравітації конвекція, спричинена різницею густини, практично зникає, а перенесення тепла й розчинених речовин до фронту кристалізації відбувається переважно шляхом дифузії.

Це має подвійні наслідки для механізмів пошкодження. З одного боку, відсутність конвективного перемішування може сприяти формуванню більш однорідного, повільнішого фронту кристалізації, що теоретично здатне зменшити механічне й осмотичне навантаження на клітини порівняно з неконтрольованим наземним заморожуванням. З іншого боку, у разі швидкого й неконтрольованого охолодження відсутність конвекції уповільнює відведення прихованої теплоти кристалізації, що може призводити до нерівномірного, локально прискореного росту кристалів і посилення механічного пошкодження клітинних структур. Таким чином, мікрогравітація не усуває класичні механізми кріопошкодження, а видозмінює кінетику процесу льодоутворення, що необхідно враховувати при проєктуванні бортових протоколів заморожування біологічних зразків.

6.3. Класичні фізико-хімічні механізми пошкодження клітин при заморожуванні.

Незалежно від того, відбувається заморожування на Землі чи в космосі, в основі пошкодження біологічних об'єктів лежать кілька універсальних фізико-

хімічних процесів. По-перше, це механічне ушкодження клітинних структур кристалами льоду, що утворюються в позаклітинному, а за швидкого охолодження, і у внутрішньоклітинному просторі *(McPherson A., DeLucas L. J., 2015).*

По-друге, це прогресуюча дегідратація клітини, яка супроводжує ріст позаклітинних кристалів льоду. Вода виходить із клітини за градієнтом осмотичного тиску, спричиняючи критичне зменшення клітинного об'єму, гіперконцентрацію електролітів і зрештою денатурацію білкових макромолекул. Двофакторну гіпотезу кріопошкодження сформулював та експериментально обґрунтував П. Мейзур на підставі кінетичного аналізу втрати клітиною води під час охолодження нижче 0 °С *(Mazur P., 1963).* Відповідно до цієї гіпотези, за повільного охолодження клітини гинуть унаслідок надмірного зневоднення та подальшої денатурації білків, тоді як за надто швидкого охолодження причиною їх загибелі стає внутрішньоклітинна кристалізація льоду. Для кожного типу клітин існує оптимальний, вузький діапазон швидкостей охолодження, у межах якого обидва механізми пошкодження мінімізовані. Ця залежність має принципове значення і для бортових протоколів заморожування в морозильних установках орбітальних станцій, оскільки конструктивно обмежена швидкість охолодження камери типу MELFI не завжди дозволяє реалізувати оптимальний для конкретного типу клітин режим.

По-третє, важливим і самостійним механізмом є фазовий перехід мембранних ліпідів зі стану «рідкого кристала» у гелеподібний стан при швидкому охолодженні – так званий температурний шок. Мембранна теорія кріопошкодження, розроблена Дж. Лавлоком на матеріалі досліджень гемолізу еритроцитів людини при заморожуванні й відтаванні *(Lovelock J. E., 1953),* пояснює цей механізм прогресуючою втратою фосфоліпідів і холестерину клітинною мембраною, підвищенням проникності мембрани для іонів та зрештою осмотичним розривом клітинної оболонки.

Четвертим механізмом, значення якого для космічних умов є специфічним, слід вважати оксидативне пошкодження клітинних структур активними формами кисню. У космічному середовищі оксидативний стрес різко посилюється додатковою радіолізною генерацією вільних радикалів у залишковій волозі замороженого зразка під дією іонізуючого випромінювання, а також фотохімічними реакціями, ініційованими жорстким ультрафіолетом *(Ott E., Kawaguchi Y., Kölbl D., Rabbow E., Rettberg P., Mora M., Moissl-Eichinger C., Weckwerth W., Yamagishi A., Milojevic T., 2020).*

6.4. Радіаційне пошкодження заморожених біооб'єктів на борту орбітальних станцій.

Найпереконливіші експериментальні дані щодо механізмів пошкодження саме заморожених біологічних об'єктів у космосі отримано в дослідах, де зразки зберігалися в замороженому стані на борту орбітальної станції спеціально для того, щоб виключити вплив мікрогравітації на клітинний метаболізм і виокремити «чистий» ефект космічної радіації. У класичному експерименті заморожені лімфобластоїдні клітини людини лінії TK6 було доставлено до модуля «Kibo», де вони зберігалися в замороженому стані протягом усього польоту (134 доби, сумарна поглинута доза 72 мЗв), після чого повернуті на Землю для аналізу *(Yatagai F., Honma M., Takahashi A., Omori K., Suzuki H., Shimazu T., Seki M., Hashizume T., Ukai A., Sugasawa K., Abe T., Dohmae N., Enomoto S., Ohnishi T., Gordon A., Ishioka N., 2011).* Дослідники зафіксували 2,3-разове зростання частоти мутацій за локусом тимідинкінази порівняно з наземним контролем, а також збільшення частки протяжних делецій, що є характерною ознакою саме для щільних кластерних пошкоджень ДНК, спричинених важкими іонізуючими частинками.

Важливо, що заморожений стан біологічного об'єкта сам по собі не запобігає радіаційному пошкодженню ДНК, оскільки іонізація треком важкої частинки відбувається практично миттєво і не залежить від агрегатного стану навколишньої води. Водночас низька температура пригнічує клітинні системи

репарації ДНК, тому пошкодження, накопичені за час заморожування, виявляються вже після відтавання й відновлення метаболічної активності. Саме тому дослідники образно називають заморожені клітини на борту станції своєрідним «біологічним дозиметром», здатним інтегрально реєструвати ефект космічної радіації за весь час польоту аналізу *(Yatagai F., Honma M., Takahashi A., Omori K., Suzuki H., Shimazu T., Seki M., Hashizume T., Ukai A., Sugasawa K., Abe T., Dohmae N., Enomoto S., Ohnishi T., Gordon A., Ishioka N., 2011).*

Подібні результати отримано і на інших біологічних моделях. Заморожені ембріональні стовбурові клітини миші зберігалися в морозильній установці MELFI за температури -95 °C і поверталися на Землю для аналізу хромосомних аберацій *(Yoshida K., Hada M., Eguchi-Kasai K., Teramura T., Cucinotta F. A., Morita T., 2014).* Дослідницька група оцінила й довгострокові функціональні наслідки радіаційного впливу на заморожені (ліофілізовані) статеві клітини. Сперматозоїди миші зберігалися в ліофілізованому вигляді на борту станції протягом 9 місяців, і хоча ДНК сперміїв зазнавала незначного пошкодження, воно успішно репарувалося цитоплазмою яйцеклітини після запліднення, не впливаючи на частоту народження і нормальний розвиток потомства *(Wakayama S., Kamada Y., Yamanaka K., 2017).* У продовженні цього дослідження та сама група підтвердила, що навіть багаторічне перебування ліофілізованих статевих клітин в умовах космічної радіації не мало б критичного впливу на життєздатне потомство *(Wakayama S., Ito D., Kamada Y., 2021).*

6.5. Вакуум, десикація і ультрафіолетове випромінювання як додаткові чинники пошкодження.

Для біологічних об'єктів, що опиняються не у внутрішньому морозильнику станції, а безпосередньо на її зовнішній поверхні, до радіаційного й температурного впливу додається чинник глибокого вакууму, який спричиняє майже миттєву сублімацію будь-якої вільної води зі зразка. У класичному огляді систематизовано реакції мікроорганізмів (вірусів,

бактеріальних клітин, спор бактерій і грибів, лишайників) на комбінацію мікрогравітації, галактичної космічної радіації, сонячного ультрафіолету та космічного вакууму, встановлених у численних космічних і лабораторних симуляційних експериментах *(Horneck G., Klaus D. M., Mancinelli R. L., 2010).* Автори підкреслюють, що найбільшої шкоди завдає саме невідфільтроване сонячне ультрафіолетове випромінювання, тоді як власне вакуум і космічний холод самі по собі переносяться значно легше стійкими формами мікроорганізмів.

Показовим прикладом слугують експерименти з тихоходками (тардіградами) – мікроскопічними безхребетними тваринами, здатними переходити у стан ангідробіозу з майже повним видаленням внутрішньоклітинної води. Висушені дорослі особини тихоходок видів Richtersius coronifer і Milnesium tardigradum були розміщені на платформі Biopan-6 Європейського космічного агентства на низькій навколоземній орбіті й протягом десяти діб зазнавали впливу космічного вакууму та різних спектральних діапазонів ультрафіолетового випромінювання. Виявилося, що тихоходки здатні переживати вплив самого космічного вакууму практично без втрати виживаності, тоді як пряме, невідфільтроване сонячне випромінювання виявилося значно шкідливішим і призводило до масової загибелі тварин. Водночас окремі особини вижили навіть після сукупної дози ультрафіолету, що перевищувала 7000 кДж/м², і виявилися здатними відновити активність і навіть репродуктивну функцію після повернення на Землю. Дослідники пов'язують таку стійкість з особливою організацією хроматину, наявністю специфічних захисних білків та ефективними системами репарації ДНК *(Jönsson K. I., Rabbow E., Schill R. O., Harms-Ringdahl M., Rettberg P., 2008).*

Аналогічні висновки отримано і для найстійкіших відомих бактерій. У серії експериментів місії Tanpopo Японського агентства аерокосмічних досліджень висушені клітини радіорезистентної бактерії Deinococcus radiodurans експонувалися на зовнішній платформі модуля «Kibo» протягом

одного, двох і трьох років *(Yamagishi A., Hashimoto H., Yano H., Imai E., Tabata M., Higashide M., Okudaira K., 2021).* Дослідження молекулярних механізмів виживання клітин після повернення на Землю показало, що клітини D. radiodurans, які перебували у складі багатошарового агрегату завтовшки понад 200 мкм, не зазнали суттєвих морфологічних пошкоджень, хоча в них накопичилися численні везикули, пов'язані із зовнішньою мембраною *(Ott E., Kawaguchi Y., Kölbl D., Rabbow E., Rettberg P., Mora M., Moissl-Eichinger C., Weckwerth W., Yamagishi A., Milojevic T., 2020).* Результати протеомного, транскриптомного та метаболомного аналізів засвідчили активацію численних компонентів системи метаболічної стрес-відповіді, передусім посилення синтезу каталаз і накопичення путресцину, який виконує функцію пастки активних форм кисню. Попередні наземні експерименти тієї ж дослідницької групи, що імітували вакуум і жорстке ультрафіолетове випромінювання, показали, що саме УФ-випромінювання з довжиною хвиль коротшою за 200 нм є визначальним чинником пошкодження, тоді як для ефективного захисту внутрішніх шарів клітинного агрегату достатньо приблизно 200 мкм шару висохлих клітин, які виконують роль своєрідного «біологічного щита» *(Kawaguchi Y., Yang Y., Kawashiri N., Shiraishi K., Takasu M., Narumi I., 2013).*

6.6. Термоциклування, інженерні рішення та комбінований вплив пошкоджувальних факторів.

Окремим чинником пошкодження є регулярне термоциклування, якому піддаються біологічні зразки на зовнішніх платформах станції внаслідок періодичного переходу орбітальної станції з освітленої ділянки орбіти в тінь Землі. За даними місії Tanpopo, температура на поверхні експонувальної платформи модуля «Kibo» циклічно змінюється в діапазоні приблизно від -120 до +50 °C з періодом близько 90 хвилин, що за типову тривалість космічного експерименту (від одного до трьох років) означає багато тисяч циклів заморожування-відтавання *(Yamagishi A., Hashimoto H., Yano H., Imai E., Tabata M., Higashide M., Okudaira K., 2021).* Такі повторні цикли фазового переходу

вода-лід у залишковій волозі зразка здатні спричиняти додаткове механічне навантаження на клітинні структури через явище рекристалізації – поступове укрупнення кристаликів льоду за рахунок дрібніших при кожному повторному циклі часткового відтавання.

Принципове значення для розуміння механізмів пошкодження в космосі має теза про синергічну, а не просто додаткову дію перелічених факторів. Поза атмосферою єдиним способом теплообміну біооб'єкта з довкіллям є випромінювання, а характер теплопередачі повністю залежить від теплопровідності матеріалу тримача зразка. Металевий корпус проводить тепло значно ефективніше, ніж тканинні чи полімерні контейнери, що використовувалися в більшості попередніх експериментів (зокрема EXPOSE-E), тим самим спотворюючи природну картину термоциклування порівняно з реальною незахищеною поверхнею станції. Тому лише експерименти на кшталт Tanpopo, де мікроорганізми розміщувалися в мінімально екранованих трекових комірках, дозволяють коректно оцінити сукупний, синергічний ефект вакууму, радіації, ультрафіолету і термоциклування, а не вплив кожного чинника окремо *(Yamagishi A., Hashimoto H., Yano H., Imai E., Tabata M., Higashide M., Okudaira K., 2021).*

З погляду молекулярної радіобіології така синергія особливо небезпечна для замороженого біологічного матеріалу. Низька температура, з одного боку, консервує клітину й пригнічує ферментативні системи репарації ДНК, а з іншого – не здатна запобігти самому акту прямої іонізації важкими частинками космічних променів. У результаті пошкодження, спричинені радіацією, механічним стресом рекристалізації та десикацією, накопичуються кумулятивно протягом усього часу перебування зразка в замороженому стані в космосі і виявляються одночасно вже після повернення об'єкта на Землю.

Практична реалізація довгострокового заморожування біологічних об'єктів на борту модульних станцій спирається на спеціалізоване інженерне обладнання. Морозильна установка MELFI, що використовується на

орбітальній станції, побудована за принципом активного термоелектричного й компресорного охолодження з кількома незалежними температурними зонами (від +2 °C до -95 °C). Надійність подібного активного обладнання прямо залежить від безперебійного енергопостачання станції. Навіть короткочасне підвищення температури здатне спричинити часткове відтавання й повторне заморожування зразка, що призводить до його пошкодження через рекристалізацію льоду. Для зовнішніх експонувальних платформ, навпаки, застосовується принципово інший, пасивний підхід. Біологічний матеріал попередньо висушують або ліофілізують, після чого розміщують у тонкостінних, мінімально екранованих трекових комірках чи полімерних плівках, свідомо відмовляючись від активного температурного контролю на користь можливості безпосередньо спостерігати природний вплив повного спектра космічних факторів *(Yamagishi A., Hashimoto H., Yano H., Imai E., Tabata M., Higashide M., Okudaira K., 2021).*

6.7. Захисні механізми та стратегії мінімізації пошкоджень.

Аналіз наведених досліджень дозволяє виокремити кілька принципових стратегій захисту заморожених біологічних об'єктів від пошкодження в умовах космічного простору. Найефективнішим і технологічно контрольованим підходом є повне екранування зразка від зовнішнього середовища шляхом розміщення його у внутрішніх, герметичних і термостабілізованих відсіках станції. Саме так організовано зберігання клітинних культур і статевих клітин у морозильних установках типу MELFI, що дозволяє виключити вплив вакууму, десикації та ультрафіолету, залишаючи лише фактор проникної космічної радіації *(Yatagai F., Honma M., Takahashi A., Omori K., Suzuki H., Shimazu T., Seki M., Hashizume T., Ukai A., Sugasawa K., Abe T., Dohmae N., Enomoto S., Ohnishi T., Gordon A., Ishioka N., 2011; Wakayama S., Kamada Y., Yamanaka K., 2017).*

Для об'єктів, які цілеспрямовано експонуються на зовнішній поверхні станції з дослідницькою метою (астробіологічні експерименти типу Tanpopo, EXPOSE, Biopan), основним природним механізмом захисту виявилося

агрегування клітин у багатошарові структури, в яких зовнішні, найбільш пошкоджені шари відігравають роль жертовного «біологічного щита», що захищає внутрішні, життєздатні шари клітин від ультрафіолетового випромінювання *(Kawaguchi Y., Yang Y., Kawashiri N., Shiraishi K., Takasu M., Narumi I., 2013; Ott E., Kawaguchi Y., Kölbl D., Rabbow E., Rettberg P., Mora M., Moissl-Eichinger C., Weckwerth W., Yamagishi A., Milojevic T., 2020).* На молекулярному рівні захисну роль відіграють специфічні фізіолого-біохімічні адаптації стійких організмів. Посилений синтез антиоксидантних ферментів і низькомолекулярних сполук-пасток активних форм кисню, ефективні багатокомпонентні системи репарації ДНК, а також особлива організація хроматину і накопичення специфічних протекторних білків у ангідробіотичних тварин, таких як тихоходки *(Jönsson K. I., Rabbow E., Schill R. O., Harms-Ringdahl M., Rettberg P., 2008; Ott E., Kawaguchi Y., Kölbl D., Rabbow E., Rettberg P., Mora M., Moissl-Eichinger C., Weckwerth W., Yamagishi A., Milojevic T., 2020).* Розуміння цих механізмів має пряме практичне значення і для класичної земної кріобіології, оскільки принципи мінімізації оксидативного стресу та кластерних пошкоджень ДНК можуть бути частково перенесені на розробку нових кріопротекторних середовищ для довгострокового зберігання клітин, тканин і навіть цілих органів.

6.8. Практичне значення для космічної біотехнології і майбутніх місій.

Отримані експериментальні дані мають безпосереднє практичне значення для планування довгострокових міжпланетних місій, зокрема майбутніх пілотованих експедицій до Місяця і Марса, під час яких тривалість перебування біологічних матеріалів у замороженому стані на борту космічного апарата буде вимірюватися роками. Дослідження демонструють, що навіть за наявної інтенсивності космічної радіації ліофілізовані статеві клітини теоретично можуть зберігатися в космосі протягом сотень років без критичної втрати репродуктивної функції, що відкриває перспективи для створення позаземних

банків генетичного матеріалу з метою збереження біорозмаїття Землі або забезпечення репродукції майбутніх міжпланетних поселенців *(Wakayama S., Ito D., Kamada Y., 2021).*

Водночас результати досліджень із замороженими клітинами людини та миші *(Yatagai F., Honma M., Takahashi A., Omori K., Suzuki H., Shimazu T., Seki M., Hashizume T., Ukai A., Sugasawa K., Abe T., Dohmae N., Enomoto S., Ohnishi T., Gordon A., Ishioka N., 2011; Yoshida K., Hada M., Eguchi-Kasai K., Teramura T., Cucinotta F. A., Morita T., 2014)* підкреслюють необхідність додаткового радіаційного екранування навіть для зразків, що зберігаються у внутрішніх, ізольованих від вакууму й температурних перепадів відділеннях станції, оскільки саме проникна компонента галактичних космічних променів залишається основним нерозв'язаним джерелом кумулятивного пошкодження заморожених біологічних об'єктів під час тривалого космічного польоту. Це формує окремий напрям інженерних досліджень – розробку легких, але ефективних радіаційно-захисних матеріалів для контейнерів довгострокового зберігання біологічних зразків на борту майбутніх модульних станцій і міжпланетних кораблів.

Окрему проблему становить те, що конструктивний матеріал самої станції не завжди діє як однозначний захист. Під впливом первинних галактичних космічних променів у товщі металевого корпусу відбуваються ядерні реакції фрагментації, у результаті яких утворюються вторинні частинки, що можуть мати навіть вищу біологічну ефективність пошкодження, ніж первинне випромінювання. Тому просте збільшення товщини традиційного алюмінієвого корпусу модуля не завжди пропорційно знижує дозове навантаження на заморожені біологічні зразки і потребує ретельного дозиметричного моделювання при проєктуванні нових поколінь орбітальних станцій, зокрема майбутньої станції Gateway на орбіті Місяця, де рівень галактичної радіації, не екранованої магнітосферою Землі, буде суттєво вищим, ніж на низькій навколоземній орбіті.

Нарешті, накопичений досвід використання морозильних установок MELFI та платформ типу Tanpopo і EXPOSE є цінною інженерною базою для розробки спеціалізованого обладнання довгострокового кріозберігання на борту майбутніх глибококосмічних місій. Це стимулює розвиток замкнених енергоефективних систем активного охолодження, здатних автономно підтримувати кріогенні температури протягом багатьох років. Водночас важливим напрямом є розроблення компактних радіаційно-захисних сховищ для найцінніших біологічних зразків, зокрема банків стовбурових клітин, репродуктивного матеріалу та референсних мікробних культур, необхідних для підтримання здоров'я екіпажу й біологічної безпеки під час багаторічних місій.

6.9. Підсумки та перспективи кріозберігання біологічних об'єктів у космосі.

Проведений аналіз дозволяє констатувати, що пошкодження біологічних об'єктів, які заморожуються в умовах космічного простору та на модульних орбітальних станціях, є результатом взаємодії кількох принципово різних, але часто синергічно діючих механізмів. До класичних кріобіологічних чинників належать механічне ушкодження кристалами льоду, осмотичний стрес, спричинений зневодненням, і фазові переходи клітинних мембран. В умовах космічного середовища їхня дія доповнюється прямою іонізацією важкими частинками галактичних космічних променів, яка спричиняє щільні кластерні пошкодження ДНК, що важко піддаються репарації *(Yatagai F., Honma M., Takahashi A., Omori K., Suzuki H., Shimazu T., Seki M., Hashizume T., Ukai A., Sugasawa K., Abe T., Dohmae N., Enomoto S., Ohnishi T., Gordon A., Ishioka N., 2011).* Додатковими несприятливими чинниками є практично миттєва десикація внаслідок глибокого вакууму та шкідлива дія невідфільтрованого ультрафіолетового випромінювання *(Jönsson K. I., Rabbow E., Schill R. O., Harms-Ringdahl M., Rettberg P., 2008; Kawaguchi Y., Yang Y., Kawashiri N., Shiraishi K., Takasu M., Narumi I., 2013).* Біологічні об'єкти також зазнають багаторазового циклічного термостресу, зумовленого періодичним переходом

станції з освітленої ділянки орбіти в тінь Землі *(Yamagishi A., Hashimoto H., Yano H., Imai E., Tabata M., Higashide M., Okudaira K., 2021).*

Заморожений стан біологічного об'єкта в космосі не є абсолютним захистом. Він пригнічує клітинні системи репарації, тим самим сприяючи кумулятивному накопиченню радіаційних пошкоджень ДНК, водночас не запобігаючи самому акту прямої іонізації. Найефективнішими стратегіями мінімізації сукупного пошкодження виявляються повне екранування зразка у внутрішніх термостабілізованих відсіках станції для цілей практичної кріоконсервації, а також природне агрегування клітин у щільні багатошарові структури для об'єктів, які цілеспрямовано експонуються в умовах відкритого космосу з дослідницькою метою. Подальше поглиблене вивчення молекулярних механізмів стійкості природних екстремофілів до комбінованого впливу холоду, вакууму, десикації та радіації є важливою фундаментальною основою для розробки нових технологій довгострокового кріозберігання біологічних матеріалів як на орбітальних станціях, так і під час майбутніх міжпланетних місій.

Висновки. Аналіз закордонної наукової літератури засвідчує, що космічна біотехнологія є динамічно розвиненим міждисциплінарним напрямом, який об'єднує щонайменше п'ять взаємопов'язаних тематичних блоків: кристалізацію білків і виробництво препаратів для потреб фармацевтики, дослідження поведінки стовбурових клітин і тканинну інженерію, 3D-біодрук та адитивні технології, вирощування рослин у космічних оранжереях і космічну мікробіологію, а також кріоконсервацію біологічних об'єктів і органів. Спільною рисою більшості проаналізованих напрямів є визнання того, що умови мікрогравітації дозволяють отримувати біологічні та фізико-хімічні результати, недосяжні в земних лабораторних умовах – від більших і якісніших кристалів білків до тканинних конструктів без допоміжного каркаса та повноцінного циклу розвитку рослин «від насінини до насінини».

Спостережено чіткий тренд переходу космічної біотехнології від пошукових наукових досліджень до практичного, комерційно орієнтованого біовиробництва. Поява автономних орбітальних фармацевтичних фабрик (Varda Space Industries), комерційних біодрукарень (Redwire) та приватних біотехнологічних платформ (Sierra Space) свідчить про формування самостійного сегмента космічної економіки. Водночас у всіх розглянутих напрямах автори одностайно вказують на низку спільних невирішених проблем: обмежений доступ до орбітальної інфраструктури, високу вартість експериментів, складність забезпечення контрольних умов, регуляторну невизначеність і необхідність розробки надійних методів повернення й подальшого використання отриманих біологічних матеріалів на Землі.

Розглянутий у цьому огляді напрям кріоконсервації біологічних об'єктів і органів, хоча формально й не прив'язаний до орбітальних експериментів, органічно доповнює загальну картину космічної біотехнології. Розвиток технологій керованого призупинення метаболізму та довгострокового банкування тканин і органів має пряме значення як для медичного забезпечення майбутніх тривалих міжпланетних місій, так і для трансплантології на Землі. Отримані результати можуть бути корисними для науковців і фахівців у галузях біотехнології, фармацевтики, рослинництва та регенеративної медицини з метою подальшого розроблення напрямів дослідження космічної біофабрикації.

Додатково розглянуті в цьому огляді механізми пошкодження біологічних об'єктів, що заморожуються безпосередньо в космічному просторі та на модульних орбітальних станціях, доповнюють розділ про кріоконсервацію. Показано, що космічне середовище накладає на класичні кріобіологічні процеси додаткові й специфічні чинники, такі як глибокий вакуум, радіаційне пошкодження ДНК важкими частинками галактичних космічних променів і циклічний термострес, які діють синергічно і потребують окремих інженерних та біологічних стратегій захисту.

References:

Buchholz K., Collins J. (2013) The roots – a short history of industrial microbiology and biotechnology. *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 97, №9, pp. 3747–3762, 2013. DOI: http://doi.org/10.1007/s00253-013-4768-2.

DeLucas L. J., Bula R. J., Hammond T., Pellis N. R. (2000) A review of microgravity biotechnology. *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston*: AIAA, 2000. DOI: http://doi.org/10.2514/6.2000-1056.

Vandenbrink J. P., Kiss J. Z. (2016) Space, the final frontier: a critical review of recent experiments performed in microgravity. *Plant Science*, vol. 243. pp. 115–119, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.11.004.

Lung C.-F., Lu H.-H., Chung C.-Y., Lin P.-T., Hsu Y.-C. (2026) A systematic review of microgravity on reproductive systems: implications for space biology and human health. *iScience*, article 114663, 2026. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isci.2026.114663.

Kim S., Min K., Park Y.-G., Moon S.-H. (2026) Stem cells in space: microgravity effects on stem cell fate and implications for regenerative medicine. *npj Microgravity*, vol. 12, article 6, 2026. http://doi.org/10.1038/s41526-025-00547-z.

Jeya DOI: raman M., Ramasubramanian S., Yadav S., Jeyaraman N. (2024) Exploring new horizons: advancements in cartilage tissue engineering under space microgravity. *Cureus*, vol. 16, №8, article e66224, 2024. DOI: http://doi.org/10.7759/cureus.66224.

Malakar V., Kuppusamy G., Vassilieva G. Y. et al. (2026) Biological experiments in space: from microgravity to molecular insights. *Microgravity Science and Technology*, vol. 38, article 14, 2026. DOI: http://doi.org/10.1007/s12217-026-10240-9.

Lin K., Ma J., Ji X., Xu K., Zhang L., Huang Y. (2025) Impact of microgravity on space microbes and application prospects. *Acta Astronautica*, vol. 236, pp. 1115–1129, 2025. DOI: http://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.07.064.

Braddock M. (2020) From target identification to drug development in space: using the microgravity assist. *Current Drug Discovery Technologies*, vol. 17, №1, pp. 45–56, 2020. DOI: http://doi.org/10.2174/1570163816666190112150014.

Yamada M., Kihira K., Iwata M., Takahashi S., Inaka K., Tanaka H., Yoshizaki I. (2021) Protein crystallization in space and its contribution to drug development. *Handbook of Space Pharmaceuticals. Springer*, pp. 1–26, 2021. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-50909-9_40-1.

McPherson A., DeLucas L. J. (2015) Microgravity protein crystallization. *npj Microgravity*, vol. 1, article 15010, 2015. DOI: http://doi.org/10.1038/npjmgrav.2015.10.

Hunsberger J. G., Pandya P., Mulligan M. K. et al. (2025) Review of disruptive technologies in 3D bioprinting. *Current Stem Cell Reports*, vol. 11, article 5, 2025. DOI: http://doi.org/10.1007/s40778-025-00246-1.

Rezapour Sarabi M., Yetisen A. K., Tasoglu S. (2023) Bioprinting in microgravity. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, vol. 9, №6, pp. 3074–3083, 2023. DOI: http://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.3c00195.

Jackson K., Brewer F., Wilkinson A., Williams A., Whiteside B., Wright H., Harper L., Wilson A. M. (2024) Microgravity crystal formation. *Crystals*, vol. 14, №1, article 12, 2024. DOI: http://doi.org/10.3390/cryst14010012.

Reichert P., Prosise W., Fischmann T. O., Scapin G., Narasimhan C., Spinale A., Polniak R., Yang X., Walsh E., Patel D., Benjamin W., Welch J., Simmons D., Strickland C. (2019) Pembrolizumab microgravity crystallization experimentation. *npj Microgravity*, vol. 5, article 28, 2019. DOI: http://doi.org/10.1038/s41526-019-0090-3.

Adams R. (2023) Building in zero gravity: the race to create factories in space. *The Guardian*. 25.09.2023. URL: https://surl.li/lvjivh

Business Wire. (2024) Rocket Lab prepares to bring in-space manufacturing capsule back to Earth for Varda Space Industries [Press release]. 15.02.2024. URL: https://surl.li/gpkasf

Foust J. (2024) Varda capsule lands in Utah. SpaceNews. 22.02.2024. URL: https://spacenews.com/varda-capsule-lands-in-utah/.

Varda Space Industries. (2024) Varda announces $90 million Series B funding to build factories in space [Press release]. PR Newswire. 05.04.2024. URL: https://surl.li/kxjdaa

Khodadad C. L. M., Hummerick M. E., Spencer L. E., Dixit A. R., Richards J. T., Romeyn M. W., Smith T. M., Wheeler R. M., Massa G. D. (2020) Microbiological and nutritional analysis of lettuce crops grown on the International Space Station. *Frontiers in Plant Science*, vol. 11, article 199, 2020. DOI: http://doi.org/10.3389/fpls.2020.00199.

Kittang Jost A.-I., Hoson T., Iversen T.-H. (2015) The utilization of plant facilities on the International Space Station – the composition, growth, and development of plant cell walls under microgravity conditions. *Plants*, vol. 4, №1, pp. 44–62, 2015. DOI: http://doi.org/10.3390/plants4010044.

Herranz R., Anken R., Boonstra J. et al. (2013) Ground-based facilities for simulation of microgravity: organism-specific recommendations for their use, and recommended terminology. *Astrobiology*, vol. 13, №1, pp. 1–17, 2013. DOI: http://doi.org/10.1089/ast.2012.0876.

Wolff S. A., Coelho L. H., Karoliussen I., Brinckmann E., Jost A.-I. K. (2014) Effects of the extraterrestrial environment on plants: recommendations for future space experiments for the MELiSSA higher plant compartment. *Life*, vol. 4, № 2, pp. 189–204, 2014. DOI: http://doi.org/10.3390/life4020189.

Nakamura M., Nishimura T., Morita M. T. (2019) Bridging the gap between amyloplasts and directional auxin transport in plant gravitropism. *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 52, pp. 54–60, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.07.007.

Kordyum E. L. (2014) Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity. *Plant Biology*, vol. 16, suppl. 1, pp. 79–90, 2014. DOI: http://doi.org/10.1111/plb.12047.

National Aeronautics and Space Administration. The Cooperative U.S./Ukrainian Experiment: An Overview. NASA Technical Reports Server, 1997. URL: https://surl.li/rgxrxp

Radio Free Europe/Radio Liberty. Ukraine: astronaut set to fly on Space Shuttle. RFE/RL. 18.11.1997 https://www.rferl.org/a/1087236.html.

Nazarenko, V., Taranenko, V., and Tkachuk, L. (2006) Biological Experiments in Space as the Object of the Educational Program in Ukraine. *International Conference On Environmental Systems*, Norfolk, Virginia, United States, July 17, 2006. DOI: http://doi.org/10.4271/2006-01-2025.

International Atomic Energy Agency, Food and Agriculture Organization of the United Nations. IAEA and FAO send seeds to International Space Station to develop crops able to adapt to climate change on Earth [Press release]. IAEA Newscenter. 07.11.2022. URL: https://surl.li/rnpgrl

International Atomic Energy Agency. Crop seeds return from space in IAEA/FAO project to help feed a warming world [Press release]. IAEA Newscenter. 17.04.2023. URL: https://surl.lt/bqrars

Jin X., Ai W., Dong W. (2022) Lignocellulose degradation, biogas production and characteristics of the microbial community in solid-state anaerobic digestion of wheat straw waste. *Life Sciences in Space Research*, vol. 32, pp. 1–7, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.09.003.

European Space Agency. ESA explores cultivated meat for space food. ESA News, 2023. URL: https://surl.li/dqtgct

Sierra Space, Redwire Corporation. Sierra Space and Redwire partner to bring in-space biotech facilities to customers via the Sierra Space platform. Sierra Space News. 21.08.2023. URL: https://surl.li/kemxdj

Redwire Corporation. Redwire BioFabrication Facility successfully prints first human knee meniscus on ISS. Redwire News. 07.09.2023. URL: https://surl.li/oqlqtn

National Aeronautics and Space Administration. 3D printing: saving weight and space at launch. NASA, 2023. URL: https://surl.li/bhnnbp

Lorber B., Hsiao W.-K., Hutchings I. M., Martin K. R. (2014) Adult rat retinal ganglion cells and glia can be printed by piezoelectric inkjet printing. *Biofabrication*, vol. 6, №1, article 015001, 2014. DOI: http://doi.org/10.1088/1758-5082/6/1/015001.

Goulart E., de Caires-Junior L. C., Telles-Silva K. A. et al. (2019) 3D bioprinting of liver spheroids derived from human induced pluripotent stem cells sustain liver function and viability in vitro. *Biofabrication*, vol. 12, №1, article 015010, 2019. DOI: http://doi.org/10.1088/1758-5090/ab4a30.

Bijlani S., Singh N. K., Eedara V. V. R., Podile A. R., Mason C. E., Wang C. C. C., Venkateswaran K. (2021) Methylobacterium ajmalii sp. nov., isolated from the International Space Station. *Frontiers in Microbiology*, vol. 12, article 639396, 2021. DOI: http://doi.org/10.3389/fmicb.2021.639396.

Choukér A., Ngo-Anh T. J., Biesbroek R., Heldmaier G., Heppener M., Bereiter-Hahn J. (2021) European Space Agency's hibernation (torpor) strategy for deep space missions: linking biology to engineering. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 131, pp. 618–626, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.09.054.

Elliott G. D., Wang S., Fuller B. J. (2017) Cryoprotectants: a review of the actions and applications of cryoprotective solutes that modulate cell recovery from ultra-low temperatures. *Cryobiology*, vol. 76, pp. 74–91, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2017.04.004.

Sheleg S., Hixon H., Cohen B., Lowry D., Nedzved M. (2008) Cardiac mitochondrial membrane stability after deep hypothermia using a xenon clathrate cryostasis protocol – an electron microscopy study. *International Journal of Clinical and Experimental Pathology*, vol. 1, №5, pp. 440–447, 2008. DOI: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2480575/.

Nozari A., Safar P., Wu X., Stezoski W. S., Henchir J., Kochanek P., Klain M., Radovsky A., Tisherman S. A. (2004) Suspended animation can allow survival without brain damage after traumatic exsanguination cardiac arrest of 60 minutes in dogs. *Journal of Trauma*, vol. 57, №6, pp. 1266–1275, 2004. DOI: http://doi.org/10.1097/01.ta.0000141332.43183.7f.

Manuchehrabadi N., Gao Z., Zhang J. et al. (2017) Improved tissue cryopreservation using inductive heating of magnetic nanoparticles. *Science Translational Medicine*, vol. 9, №379, article eaah4586, 2017. DOI: http://doi.org/10.1126/scitranslmed.aah4586.

Han Z., Rao J. S., Gangwar L., Namsrai B.-E., Pasek-Allen J. L., Etheridge M. L., Wolf S. M., Pruett T. L., Bischof J. C., Finger E. B. (2023) Vitrification and nanowarming enable long-term organ cryopreservation and life-sustaining kidney transplantation in a rat model. *Nature Communications*, vol. 14, article 3407, 2023. DOI: http://doi.org/10.1038/s41467-023-38824-8.

Horneck G., Klaus D. M., Mancinelli R. L. (2010) Space microbiology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 74, №1, pp. 121–156, 2010. DOI: http://doi.org/10.1128/MMBR.00016-09.

Mazur P. (1963) Kinetics of water loss from cells at subzero temperatures and the likelihood of intracellular freezing. *Journal of General Physiology*, vol. 47, №2, pp. 347–369, 1963. DOI: http://doi.org/10.1085/jgp.47.2.347.

Lovelock J. E. (1953) The haemolysis of human red blood-cells by freezing and thawing. *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 10, pp. 414–426, 1953. DOI: http://doi.org/10.1016/0006-3002(53)90273-X.

Ott E., Kawaguchi Y., Kölbl D., Rabbow E., Rettberg P., Mora M., Moissl-Eichinger C., Weckwerth W., Yamagishi A., Milojevic T. (2020) Molecular repertoire of Deinococcus radiodurans after 1 year of exposure outside the International Space Station within the Tanpopo mission. *Microbiome*, vol. 8, article 150, 2020. DOI: http://doi.org/10.1186/s40168-020-00927-5.

Yatagai F., Honma M., Takahashi A., Omori K., Suzuki H., Shimazu T., Seki M., Hashizume T., Ukai A., Sugasawa K., Abe T., Dohmae N., Enomoto S., Ohnishi T., Gordon A., Ishioka N. (2011) Frozen human cells can record radiation damage accumulated during space flight: mutation induction and radioadaptation. *Radiation and Environmental Biophysics*, vol. 50, № 1, pp. 125–134, 2011. DOI: http://doi.org/10.1007/s00411-010-0348-3.

Yoshida K., Hada M., Eguchi-Kasai K., Teramura T., Cucinotta F. A., Morita T. (2014) Estimation of effects of space radiation using frozen mouse ES cells in ISS. *Journal of Radiation Research*, vol. 55, suppl. 1, pp. i119–i120, 2014. DOI: http://doi.org/10.1093/jrr/rrt217.

Wakayama S., Kamada Y., Yamanaka K. et al. (2017) Healthy offspring from freeze-dried mouse spermatozoa held on the International Space Station for 9 months. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, №23, pp. 5988–5993, 2017. DOI: http://doi.org/10.1073/pnas.1701425114.

Wakayama S., Ito D., Kamada Y. et al. (2021) Evaluating the long-term effect of space radiation on the reproductive normality of mammalian sperm preserved on the International Space Station. *Science Advances*, vol. 7, №24, article eabg5554, 2021. DOI: http://doi.org/10.1126/sciadv.abg5554.

Jönsson K. I., Rabbow E., Schill R. O., Harms-Ringdahl M., Rettberg P. (2008) Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit. *Current Biology*, vol. 18, №17, pp. R729–R731, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.cub.2008.06.048.

Yamagishi A., Hashimoto H., Yano H., Imai E., Tabata M., Higashide M., Okudaira K. (2021) Four-year operation of Tanpopo: astrobiology exposure and micrometeoroid capture experiments on the JEM exposed facility of the International Space Station. *Astrobiology*, vol. 21, №9, pp. 1153–1168, 2021. DOI: http://doi.org/10.1089/ast.2020.2430.

Kawaguchi Y., Yang Y., Kawashiri N., Shiraishi K., Takasu M., Narumi I. et al. (2013) The possible interplanetary transfer of microbes: assessing the viability of Deinococcus spp. under the ISS environmental conditions for performing exposure experiments of microbes in the Tanpopo mission. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, vol. 43, №4-5, pp. 411–428, 2013. DOI: http://doi.org/10.1007/s11084-013-9346-1.

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-487
UDC 378.147:614.88

CHAPTER 14.
THEORETICAL AND PRACTICAL FOUNDATIONS OF PREPARING HIGHER EDUCATION STUDENTS TO PROVIDE FIRST PRE-MEDICAL EMERGENCY CARE

Yuliia PARYSHKURA
Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Professor,
Assistant Professor of the Department of Physical Culture,
Sports and Rehabilitation, State University of Trade
and Economics, (19 Kyoto St., Kyiv 02156, Ukraine)
y.paryshkura@knute.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-8777-1726

Valerii DOVHANIUK
Senior Lecturer at the Department of Special Physical Training,
Penitentiary Academy of Ukraine (34 Honcha Street,
Chernihiv, 14000, Ukraine)
vdovhan08@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-2152-1917

Abstract. The problem of preparing higher education students for timely, safe, and effective response to emergency conditions is examined. The relevance of developing the corresponding skills in future specialists in specialty A7 Physical Culture and Sports and specialty 262 Law Enforcement is substantiated, as their professional activities involve an increased risk of injuries, wounds, sudden deterioration in health, and emergency situations. The importance of priority actions at the scene is revealed, including assessing safety, checking consciousness and breathing, calling emergency medical services, controlling massive bleeding, performing cardiopulmonary resuscitation, and using an automated external defibrillator.

The regulatory and legal framework for organizing such training in Ukraine is characterized. It is determined that effective mastery of emergency response algorithms requires a combination of theoretical instruction, practical classes, simulation-based learning, situational tasks, and regular skills refreshment. A structure of the corresponding readiness is proposed, comprising cognitive, operational and activity-based, situational and analytical, communicative and organizational, and personal and psychological components.

It is established that, for students majoring in A7 Physical Culture and Sports, priority should be given to responding to injuries and acute conditions during educational, training, and competitive activities, whereas for students majoring in 262 Law Enforcement, the emphasis should be placed on actions in high-risk

environments, during mass events, road traffic accidents, and incidents involving injuries. The research findings may be used to improve the content of educational components, practical classes, and professionally oriented training scenarios in higher education institutions.

Keywords: emergency conditions, action algorithm, life safety, simulation-based learning, emergency response, cardiopulmonary resuscitation, professional readiness.

ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧНІ ЗАСАДИ ПІДГОТОВКИ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ДО НАДАННЯ ПЕРШОЇ ДОМЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ

Анотація. Розглянуто проблему підготовки здобувачів вищої освіти до своєчасного, безпечного та ефективного реагування в умовах невідкладних станів. Обґрунтовано актуальність формування відповідних умінь у майбутніх фахівців спеціальностей А7 Фізична культура і спорт та 262 Правоохоронна діяльність, професійна діяльність яких пов'язана з підвищеним ризиком виникнення травм, поранень, раптового погіршення стану здоров'я та надзвичайних ситуацій. Розкрито значення першочергових дій на місці події, зокрема оцінювання безпеки, перевірки свідомості й дихання, виклику екстреної медичної допомоги, зупинки масивної кровотечі, проведення серцево-легеневої реанімації та використання автоматичного зовнішнього дефібрилятора.

Охарактеризовано нормативно-правову основу організації такої підготовки в Україні та визначено, що ефективне опанування алгоритмів дій потребує поєднання теоретичної підготовки, практичних занять, симуляційного навчання, ситуаційних завдань і регулярного оновлення навичок. Запропоновано структуру відповідної готовності, що охоплює когнітивний, операційно-діяльнісний, ситуаційно-аналітичний, комунікативно-організаційний та особистісно-психологічний компоненти.

Установлено, що для здобувачів спеціальності А7 Фізична культура і спорт пріоритетним є реагування на травми й гострі стани під час освітньої, тренувальної та змагальної діяльності, а для здобувачів спеціальності 262 Правоохоронна діяльність – дії в умовах підвищеної небезпеки, масових подій, дорожньо-транспортних пригод і поранень. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення змісту освітніх компонентів, практичних занять і професійно орієнтованих тренувальних сценаріїв у закладах вищої освіти.

Ключові слова: невідкладні стани, алгоритм дій, безпека життєдіяльності, симуляційне навчання, екстрене реагування, серцево-легенева реанімація, професійна готовність.

Вступ. Надання першої домедичної допомоги є важливою складовою системи громадського здоров'я, безпеки життєдіяльності та професійної

підготовки фахівців, діяльність яких пов’язана із забезпеченням життя і здоров’я людей. Від своєчасності та послідовності дій осіб, які першими опинилися поруч із постраждалим, залежить збереження життя, попередження розвитку тяжких ускладнень, зменшення наслідків травм та підвищення ефективності подальшого лікування і реабілітації. Саме перші хвилини після виникнення невідкладного стану часто є вирішальними, тому здатність швидко оцінити ситуацію, викликати екстрену медичну допомогу та розпочати необхідні заходи належить до базових професійних компетентностей сучасного фахівця *(Волянський П. Б. та ін., 2020; Григус І. М., Романишин М. Я., 2013; World Health Organization, 2024).*

Актуальність формування таких компетентностей значно зросла в Україні в умовах воєнного стану, що супроводжується збільшенням кількості травм, мінно-вибухових ушкоджень, масивних кровотеч, опіків і поранень. Водночас невідкладні ситуації залишаються поширеними і в мирний час під час освітнього та тренувального процесів, побутового травматизму та під час проведення масових заходів. Це обумовлює необхідність поєднання теоретичної підготовки з формуванням практичних навичок надання першої домедичної допомоги *(Тарасюк В. С. та ін., 2017).*

Для здобувачів спеціальності А7 Фізична культура і спорт такі компетентності є невід'ємною складовою професійної діяльності тренера, учителя фізичної культури, інструктора та організатора спортивних заходів. У процесі навчально-тренувальної та змагальної діяльності вони повинні вміти своєчасно оцінювати стан постраждалого, надавати необхідну допомогу та забезпечувати безпеку учасників освітнього процесу.

Для здобувачів спеціальності 262 Правоохоронна діяльність навички надання першої домедичної допомоги є необхідним елементом професійної готовності до виконання службових обов'язків. Працівники правоохоронних органів нерідко першими прибувають на місце дорожньо-транспортних пригод, надзвичайних ситуацій, масових заходів або інших подій із постраждалими,

тому від їхніх професійних дій значною мірою залежить збереження життя людей до прибуття бригади екстреної медичної допомоги.

Таким чином, формування компетентностей із надання першої домедичної допомоги є важливою складовою професійної підготовки здобувачів вищої освіти Державного торговельно-економічного університету (ДТЕУ) та Пенітенціарної академії України (ПАУ) для майбутніх фахівців спеціальностей А7 Фізична культура і спорт та 262 Правоохоронна діяльністьці компетентності забезпечують готовність до професійної діяльності, сприяють підвищенню безпеки освітнього, спортивного та службового середовища, а також дозволяють ефективно діяти в умовах невідкладних станів і надзвичайних ситуацій.

Мета – розкрити теоретично-методичні та практичні засади надання першої домедичної допомоги у процесі формування професійних компетентностей здобувачів вищої освіти.

Завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан проблеми надання першої домедичної допомоги та її значення у професійній діяльності.

2. Охарактеризувати нормативно-правові засади організації надання першої домедичної допомоги в Україні.

3. Розкрити сучасні алгоритми надання допомоги при найбільш поширених невідкладних станах відповідно до рекомендацій МОЗ України та міжнародних стандартів.

4. Обґрунтувати особливості формування професійних компетентностей майбутніх фахівців щодо ефективного надання першої домедичної допомоги.

Наукова новизна полягає у комплексному обґрунтуванні змісту професійної підготовки майбутніх фахівців щодо формування компетентностей із надання першої домедичної допомоги шляхом інтеграції сучасних

міжнародних рекомендацій, чинної нормативно-правової бази України та професійно орієнтованих алгоритмів дій в освітній процес.

Практичне значення полягає у можливості використання запропонованих матеріалів під час викладання освітніх компонентів «Долікарняна медична допомога», «Домедична підготовка», «Спортивна медицина» у процесі професійної підготовки здобувачів спеціальностей А7 Фізична культура і спорт та 262 Правоохоронна діяльність у ДТЕУ та ПАУ.

Теоретико-правові засади надання першої домедичної допомоги. Надання першої домедичної допомоги є одним із ключових напрямів забезпечення громадського здоров'я, безпеки життєдіяльності населення та професійної підготовки фахівців, діяльність яких пов'язана із збереженням життя і здоров'я людини. За сучасних умов зростання кількості дорожньо-транспортних пригод, виробничого й побутового травматизму, надзвичайних ситуацій, воєнних дій та інших небезпечних подій особливого значення набуває своєчасне надання допомоги постраждалим до прибуття бригади екстреної медичної допомоги. Саме перші хвилини після виникнення невідкладного стану часто визначають подальший прогноз щодо життя, здоров'я та ефективності лікування потерпілого *(Волянський П. Б. та ін., 2020; Григус І. М., Романишин М. Я., 20213).*

Перша домедична допомога є невід'ємною складовою системи громадського здоров'я, охорони здоров'я та безпеки життєдіяльності населення. Її основною метою є своєчасне виявлення невідкладного стану, підтримання життєво важливих функцій постраждалого та забезпечення його безпечної передачі бригаді екстреної медичної допомоги *(Крилюк В. О. та ін., 2017; Тарасюк В. С. та ін., 2017).*

Ключовими елементами домедичної допомоги є раннє виявлення загрозливих для життя станів, своєчасне виконання базових рятувальних заходів і безпечна передача постраждалого медичним працівникам. Реалізація зазначених етапів забезпечує скорочення часу до початку допомоги, підвищує

ефективність лікування та сприяє зменшенню смертності й інвалідизації населення *(Perkins G. D. et al., 2021; Olasveengen T. M. et al., 2021).*

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) наголошує, що значна частина смертей і тяжких ускладнень при травмах та гострих патологічних станах може бути попереджена за умови своєчасного проведення базових заходів домедичної допомоги. Особливо важливими є раннє розпізнавання невідкладного стану, виклик екстреної медичної допомоги, забезпечення прохідності дихальних шляхів, зупинка критичної кровотечі, проведення серцево-легеневої реанімації та інші дії, спрямовані на підтримання життєво важливих функцій організму до передачі постраждалого медичним працівникам *(World Health Organization, 2024).*

Ефективність першої домедичної допомоги значною мірою залежить від правильності та послідовності виконання основних дій особою, яка першою опинилася поруч із постраждалим. Незалежно від характеру травми чи невідкладного стану допомога повинна надаватися відповідно до чіткого алгоритму, що передбачає оцінку ситуації, забезпечення власної безпеки, первинне обстеження постраждалого, виклик екстреної медичної допомоги та виконання необхідних рятувальних заходів (рис. 1.) *(Крилюк В. О. та ін., 2017; МОЗ України, 2022).*

Рис. 1. Послідовність дій при наданні першої домедичної допомоги

Джерело: розроблено авторами на основі рекомендацій Європейської ради реанімації (Olasveengen T. M. et al., 2021), Американської асоціації серця (Merchant et al., 2020), Всесвітньої організації охорони здоров'я (World Health Organization, 2024) та наказу Міністерства охорони здоров'я України № 441 (МОЗ України, 2022).

Представлений алгоритм відображає універсальну послідовність дій під час надання першої домедичної допомоги. Його структура ґрунтується на міжнародних рекомендаціях з базової підтримки життя (Basic Life Support) та вимогах чинного законодавства України щодо організації надання домедичної допомоги. Дотримання зазначеної послідовності забезпечує своєчасне виявлення загрозливих для життя станів, мінімізує ризик для особи, яка надає допомогу, сприяє швидкому залученню екстреної медичної допомоги та підвищує ефективність рятувальних заходів до моменту передачі постраждалого медичним працівникам (*Olasveengen T. M. et al., 2021; МОЗ України, 2022*).

Правові засади надання домедичної допомоги визначаються Законом України «Про екстрену медичну допомогу», Основами законодавства України про охорону здоров'я та наказом Міністерства охорони здоров'я України від 09 березня 2022 року № 441 «Про затвердження порядків надання домедичної допомоги особам при невідкладних станах». Саме цей наказ є основним нормативним документом, який регламентує сучасні алгоритми надання домедичної допомоги особами без медичної освіти при найбільш поширених невідкладних станах. Ним затверджено порядки надання допомоги особами, які відповідно до своїх службових обов'язків повинні володіти необхідними теоретичними знаннями та практичними навичками для збереження життя постраждалих до прибуття бригади екстреної медичної допомоги *(Закон України «Про екстрену медичну допомогу», 2012; Основи законодавства України про охорону здоров'я, 1992; МОЗ України, 2022).*

Ефективне функціонування системи надання першої домедичної допомоги забезпечується комплексом взаємопов'язаних нормативно-правових актів, які визначають організаційні засади підготовки осіб, що надають допомогу, регламентують порядок їхніх дій у невідкладних ситуаціях та встановлюють сучасні алгоритми реагування *(Кабінет Міністрів України, 2012; МОЗ України, 2022).*

Сучасна професійна освіта орієнтується на компетентнісний підхід, який передбачає формування не лише системи знань, а й здатності застосовувати їх у реальних професійних ситуаціях. У зв'язку з цим опанування алгоритмів домедичної допомоги є важливою складовою підготовки майбутніх фахівців, професійна діяльність яких пов'язана з високою відповідальністю за життя і здоров'я людей.

Особливого значення це набуває для здобувачів спеціальності А7 Фізична культура і спорт, які у своїй майбутній професійній діяльності працюватимуть із різними віковими категоріями населення, організовуватимуть освітній, тренувальний і змагальний процеси та відповідатимуть за безпеку їх учасників.

Під час занять фізичною культурою і спортом можливе виникнення спортивних травм, гострих серцево-судинних станів, порушень дихання, теплових уражень та інших невідкладних ситуацій, що потребують негайного реагування. Саме тому стандартами спеціальності передбачено програмний результат навчання (ПРН) 16 – «Надавати долікарську медичну допомогу при невідкладних станах та патологічних процесах в організмі людини», досягнення якого забезпечується шляхом вивчення нормативно-правових засад, сучасних алгоритмів домедичної допомоги та відпрацювання практичних навичок.

Не менш важливими такі компетентності є для здобувачів спеціальності 262 «Правоохоронна діяльність», професійна діяльність яких безпосередньо пов'язана з реагуванням на надзвичайні події, дорожньо-транспортні пригоди, випадки насильства, масові заходи та інші ситуації, що супроводжуються травмуванням людей. Працівники правоохоронних органів нерідко першими прибувають на місце події, тому саме від їхніх своєчасних і професійних дій залежить збереження життя постраждалих до прибуття медичних працівників. Відповідно, освітньою програмою передбачено ПРН19 – «Надавати невідкладну, зокрема домедичну і медичну, допомогу», що визначає необхідність ґрунтовної теоретичної та практичної підготовки у цій сфері.

Таким чином, сучасний стан проблеми свідчить, що надання домедичної допомоги є не лише складовою системи охорони здоров'я, а й одним із важливих напрямів професійної освіти. Інтеграція вимог чинного законодавства України, міжнародних рекомендацій і компетентнісного підходу до підготовки здобувачів вищої освіти забезпечує формування готовності майбутніх фахівців до ефективних дій у невідкладних ситуаціях, підвищує рівень безпеки освітнього, спортивного та службового середовища, а також сприяє збереженню життя і здоров'я людини *(Greif R. et al., 2021; МОЗ України, 2022).*

Сучасна система надання першої домедичної допомоги є важливою складовою державної політики у сфері охорони здоров'я, цивільного захисту та безпеки життєдіяльності населення. Її функціонування ґрунтується на

міжнародних рекомендаціях і вимогах національного законодавства, що визначають порядок підготовки осіб, алгоритми дій при невідкладних станах та відповідальність за своєчасне надання допомоги постраждалим *(Закон України «Про екстрену медичну допомогу», 2012; Perkins G. D.et al., 2021).*

Актуальність удосконалення нормативно-правового забезпечення обумовлена значною поширеністю травматизму у світі. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, травми щороку спричиняють понад 4,4 млн смертей, що становить майже 8 % усіх випадків смертності. Основними причинами залишаються дорожньо-транспортні пригоди, падіння, утоплення, опіки, отруєння та насильницькі ушкодження. Особливо критичними є стани, коли життя постраждалого залежить від дій очевидців у перші хвилини після події, зокрема при раптовій зупинці кровообігу, масивній кровотечі, порушенні прохідності дихальних шляхів і тяжких травмах. Міжнародні рекомендації Європейської ради реанімації (ERC), Американської асоціації серця (AHA) та Всесвітньої організації охорони здоров'я підтверджують, що своєчасне проведення серцево-легеневої реанімації, швидка зупинка критичної кровотечі та застосування автоматичного зовнішнього дефібрилятора істотно підвищують шанси постраждалого на виживання *(World Health Organization, 2024; Perkins G. D. et al., 2021; Merchant R. M. et al., 2020).*

В Україні нормативно-правове регулювання надання домедичної допомоги здійснюється на основі комплексу законодавчих актів, які визначають організаційні засади, права та обов'язки осіб, порядок їх підготовки й алгоритми дій у невідкладних ситуаціях *(Основи законодавства України про охорону здоров'я, 1992; Закон України «Про екстрену медичну допомогу», 2012).*

Основу правового регулювання становить Закон України «Про екстрену медичну допомогу», який визначає правові, організаційні та економічні засади функціонування системи екстреної медичної допомоги *(Закон України «Про екстрену медичну допомогу», 2012).* Важливим нормативним документом є

Основи законодавства України про охорону здоров'я, які визначають загальні принципи державної політики у сфері охорони здоров'я, гарантують право громадян на своєчасне отримання медичної допомоги та передбачають створення умов для навчання населення навичкам надання домедичної допомоги. Законодавство також визначає відповідальність державних органів, закладів освіти, роботодавців і посадових осіб за забезпечення належного рівня підготовки осіб, діяльність яких пов'язана з ризиком виникнення невідкладних станів *(Основи законодавства України про охорону здоров'я, 1992).*

Організаційні засади підготовки осіб, які відповідно до професійних обов'язків зобов'язані надавати домедичну допомогу, визначає постанова Кабінету Міністрів України від 21 листопада 2012 року № 1115 «Про затвердження Порядку підготовки та підвищення кваліфікації осіб, які зобов'язані надавати домедичну допомогу». Документ регламентує категорії осіб, які проходять відповідне навчання, вимоги до організації освітнього процесу, періодичність підготовки та оцінювання рівня сформованості практичних компетентностей *(Кабінет Міністрів України, 2012).*

Ключовим нормативним актом, який безпосередньо регламентує сучасні алгоритми надання домедичної допомоги, є наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09 березня 2022 року № 441 «Про затвердження порядків надання домедичної допомоги особам при невідкладних станах». Наказ затверджує уніфіковані порядки надання допомоги особами без медичної освіти при найбільш поширених невідкладних станах, зокрема при раптовій зупинці кровообігу, масивній зовнішній кровотечі, порушенні прохідності дихальних шляхів, травмах, опіках, утопленні, ураженні електричним струмом, анафілаксії, судомах, гіпоглікемії, гострому мозковому інсульті та інших критичних станах. Запровадження єдиних алгоритмів забезпечує стандартизацію дій осіб, які першими опиняються поруч із постраждалим, та сприяє підвищенню ефективності домедичної допомоги *(МОЗ України, 2022).*

Отже, нормативно-правова база України створює цілісну систему регулювання надання домедичної допомоги, яка поєднує міжнародні підходи, вимоги національного законодавства та сучасні стандарти професійної підготовки. Її опанування є необхідною умовою формування компетентностей майбутніх фахівців, здатних ефективно реагувати на невідкладні стани, забезпечувати безпеку громадян і діяти відповідно до вимог чинного законодавства України *(Кабінет Міністрів України, 2012; МОЗ України, 2022).*

Сучасні алгоритми домедичної допомоги як основа формування професійних компетентностей майбутніх фахівців. Домедична допомога є комплексом невідкладних організаційних і практичних заходів, спрямованих на збереження життя постраждалого, підтримання основних функцій його організму, запобігання погіршенню стану та зменшення ризику ускладнень до прибуття бригади екстреної медичної допомоги. Її ефективність визначається не складністю застосованих втручань, а своєчасністю розпізнавання загрозливого стану, правильною послідовністю дій і безперервністю допомоги *(Волянський П. Б. та ін., 2020; Крилюк В. О. та ін., 2017).*

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, травми та насильницькі ушкодження щороку спричиняють близько 4,4 млн смертей, що становить майже 8 % усіх випадків смерті у світі. До найпоширеніших причин належать дорожньо-транспортні пригоди, падіння, утоплення, опіки, отруєння та насильницькі ушкодження. Значну частину тяжких наслідків можна зменшити завдяки своєчасній допомозі на місці події та належній організації догоспітального етапу *(World Health Organization, 2024).*

В Україні основним нормативним документом, що визначає механізми надання домедичної допомоги особами без медичної освіти, які за своїми службовими обов'язками повинні володіти відповідними навичками, є наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09 березня 2022 року № 441. Ним затверджено 29 порядків надання допомоги при раптовій зупинці кровообігу, порушенні прохідності дихальних шляхів, масивній кровотечі, травмах, опіках,

утопленні, анафілаксії, гіпоглікемії, інсульті, інфаркті міокарда, отруєннях, судомах та інших невідкладних станах. Наказ є чинним і встановлює обов'язкову нормативну основу підготовки осіб, які надають домедичну допомогу *(МОЗ України, 2022).*

Міжнародні стандарти базової підтримки життя розробляються на основі систематичного оцінювання наукових доказів Міжнародним погоджувальним комітетом з реанімації, Європейською радою реанімації та Американською асоціацією серця. Рекомендації AHA 2020 року охоплюють розпізнавання зупинки кровообігу, активацію системи екстреного реагування, якісну серцево-легеневу реанімацію, застосування автоматичного зовнішнього дефібрилятора й усунення обструкції дихальних шляхів стороннім тілом. Вони доповнюють національні порядки сучасними доказовими підходами, однак під час професійної підготовки та практичних дій в Україні пріоритет мають затверджені нормативні алгоритми МОЗ України *(Perkins G. D. et al., 2021; Olasveengen T. M, et al., 2021; Merchant R. M. et al., 2020).*

Незалежно від виду травми або захворювання надання допомоги починається з оцінювання ситуації. Особа, яка надає допомогу, не повинна наражати на небезпеку себе, постраждалого або інших людей. Потенційними загрозами можуть бути дорожній рух, пожежа, електричний струм, руйнування конструкцій, вибухонебезпечні предмети, токсичні речовини, агресивні люди, вода, дим, бойові дії або інші небезпечні чинники. Наближатися до постраждалого дозволено лише тоді, коли місце події є безпечним або коли ризик можна мінімізувати доступними засобами *(Волянський П. Б. та ін., 2020; МОЗ України, 2022).*

За можливості використовують засоби індивідуального захисту: одноразові рукавички, захисну маску, окуляри або бар'єрний пристрій для проведення штучної вентиляції легень. У ситуаціях із кількома постраждалими необхідно швидко оцінити їх кількість, характер події та потребу у виклику додаткових служб *(Тарасюк В. С. та ін., 2017; МОЗ України, 2022).*

Універсальний алгоритм первинних дій охоплює:

1. Виявлення події та оцінювання безпеки місця.
2. Встановлення контакту з постраждалим і перевірку його свідомості.
3. Оцінювання прохідності дихальних шляхів та наявності нормального дихання.
4. Виявлення масивної зовнішньої кровотечі.
5. Виклик бригади екстреної медичної допомоги за номером 103 або єдиним номером екстреної допомоги 112.
6. Виконання невідкладних заходів відповідно до виявленого стану.
7. Постійний контроль свідомості та дихання.
8. Психологічну підтримку постраждалого.
9. Передавання медичним працівникам інформації про обставини події, стан постраждалого та проведені заходи.

Перевіряючи свідомість, необхідно голосно звернутися до людини, поставити просте запитання та обережно торкнутися її за плечі. Не слід сильно струшувати постраждалого, особливо за наявності ознак травми голови, шиї або хребта. Якщо реакція відсутня, відкривають дихальні шляхи та протягом не більше ніж 10 секунд оцінюють дихання. Нерегулярні поодинокі судомні вдихи – агональне дихання – не вважаються нормальним диханням і можуть бути ознакою зупинки кровообігу. Сучасні рекомендації наголошують, що особа без медичної освіти не повинна витрачати час на пошук пульсу: відсутність свідомості та нормального дихання є достатньою підставою для початку серцево-легеневої реанімації *(Olasveengen T. M. et al., 2021; Merchant R. M. et al., 2020).*

Під час виклику екстреної медичної допомоги необхідно чітко повідомити: точне місце події та орієнтири; номер телефону, з якого здійснюється виклик; характер події; приблизну кількість постраждалих; стать і орієнтовний вік постраждалого; стан свідомості та дихання; наявність масивної кровотечі або інших загроз; заходи, які вже виконуються.

Розмову слід завершувати лише після дозволу диспетчера. Бажано увімкнути гучний зв'язок, щоб одночасно виконувати необхідні дії та дотримуватися вказівок диспетчера *(МОЗ України, 2022).*

Раптова зупинка кровообігу – один із найбільш критичних невідкладних станів. Вона характеризується припиненням ефективної роботи серця, втратою свідомості та відсутністю нормального дихання. Без негайного проведення серцево-легеневої реанімації швидко розвивається незворотне ушкодження головного мозку *(Olasveengen T. M. et al., 2021; Merchant R. M. et al., 2020).*

Основними ознаками зупинки кровообігу є:

– відсутність реакції на звернення і дотик;

– відсутність нормального дихання;

– поодинокі судомні, хрипкі або агональні вдихи;

– іноді – короткочасні судомні рухи на початку зупинки кровообігу.

Алгоритм дій передбачає таку послідовність:

1. Переконатися у безпеці місця події.
2. Перевірити свідомість постраждалого.
3. Покликати на допомогу.
4. Відкрити дихальні шляхи, закинувши голову та піднявши підборіддя, якщо немає очевидних обставин, що перешкоджають цьому.
5. Протягом не більше ніж 10 секунд оцінити дихання.
6. За відсутності нормального дихання викликати 103 або 112 та попросити принести автоматичний зовнішній дефібрилятор.
7. Негайно розпочати натискання на грудну клітку.
8. Поєднувати 30 натискань із двома штучними вдихами, якщо особа навчена й готова їх виконувати.
9. Якнайшвидше під'єднати автоматичний зовнішній дефібрилятор.
10. Продовжувати реанімацію до появи ознак життя, прибуття медичних працівників, фізичного виснаження рятувальника або виникнення небезпеки *(МОЗ України, 2022; Olasveengen T. M. et al., 2021).*

Постраждалого необхідно покласти на спину на тверду рівну поверхню. Основу долоні однієї руки розташовують у центрі грудної клітки, на нижній половині груднини, другу руку кладуть зверху. Пальці зчіплюють або піднімають, щоб не тиснути на ребра. Руки тримають випрямленими в ліктях, плечі розташовують вертикально над грудниною.

Натискання виконують із частотою 100-120 за хвилину. Глибина компресій у дорослого має становити приблизно 5-6 см. Після кожного натискання необхідно повністю розвантажувати грудну клітку, не відриваючи рук від груднини. Слід уникати тривалих перерв, надмірно швидких, поверхневих або занадто глибоких компресій *(Olasveengen T. M.et al., 2021; Merchant R. M. et al., 2020).*

Штучну вентиляцію проводять після відкриття дихальних шляхів. Ніс постраждалого затискають, охоплюють його рот своїми губами через захисний бар'єр і виконують вдих тривалістю близько однієї секунди, спостерігаючи за підняттям грудної клітки. Другий вдих проводять аналогічно. Вентиляція не повинна бути надмірною, оскільки занадто сильне або часте вдування повітря може погіршити ефективність реанімації.

Компресійна реанімація є кращою, ніж повна бездіяльність. Водночас поєднання компресій із вентиляцією особливо важливе при утопленні, асфіксії, отруєнні, зупинці дихання та у дітей. Міжнародні рекомендації 2021 року зберігають раннє розпізнавання зупинки кровообігу, негайну активацію екстреної служби, високоякісні компресії та швидку дефібриляцію як ключові складові базової підтримки життя *(Olasveengen T. M. et al., 2021; Merchant R. M. et al., 2020).*

Автоматичний зовнішній дефібрилятор – пристрій, який аналізує серцевий ритм і за потреби рекомендує або автоматично виконує електричний розряд. Він призначений для використання не лише медичними працівниками, а й навченими особами без медичної освіти. Пристрій подає голосові та візуальні

команди, тому основним правилом є чітке виконання його вказівок *(Olasveengen T. M. et al., 2021; Merchant R. M. et al., 2020).*

Після отримання дефібрилятора необхідно:

1. Увімкнути пристрій.
2. Оголити грудну клітку постраждалого.
3. За потреби швидко висушити шкіру.
4. Наклеїти електроди відповідно до схеми на упаковці: один – у верхній правій частині грудної клітки під ключицею, другий – на лівій бічній поверхні нижче пахвової ділянки.
5. Не торкатися постраждалого під час аналізу ритму.
6. Якщо рекомендовано розряд, переконатися, що ніхто не торкається людини, голосно попередити оточуючих і натиснути кнопку розряду, якщо це передбачено конструкцією.
7. Відразу після розряду відновити серцево-легеневу реанімацію.
8. Якщо розряд не рекомендовано, також негайно продовжити реанімацію.
9. Не знімати електроди до прибуття медичних працівників.

За наявності двох рятувальників один проводить серцево-легеневу реанімацію, а інший готує дефібрилятор. Компресії переривають лише на час аналізу ритму й виконання розряду. Раннє застосування дефібрилятора разом із високоякісною реанімацією є одним із найважливіших заходів підвищення виживаності при зупинці кровообігу *(Olasveengen T. M. et al., 2021; Merchant R. M. et al., 2020).*

Обструкція дихальних шляхів найчастіше виникає під час приймання їжі, коли шматок їжі або інший предмет потрапляє у верхні дихальні шляхи. Стан може бути частковим або повним *(Григус І. М., Романишин М. Я., 2013; МОЗ України, 2022).* При частковій обструкції людина зазвичай може говорити, кашляти та дихати. У такій ситуації необхідно заохочувати її до інтенсивного

кашлю, не виконуючи ударів по спині без потреби. Постраждалого не залишають самого та спостерігають за його станом.

Ознаками тяжкої обструкції є: нездатність говорити або кашляти; беззвучні спроби вдиху; різке утруднення або відсутність дихання; посиніння шкіри; хапання руками за шию; швидка втрата свідомості.

При тяжкій обструкції у притомного дорослого необхідно:

1. Повідомити постраждалому про намір допомогти.
2. Нахилити його тулуб уперед.
3. Завдати до п’яти різких ударів основою долоні між лопатками.
4. Після кожного удару перевіряти, чи вийшло стороннє тіло.
5. Якщо удари неефективні, виконати до п’яти абдомінальних поштовхів.
6. Чергувати п’ять ударів між лопатками та п’ять абдомінальних поштовхів до відновлення прохідності дихальних шляхів або втрати свідомості.
7. Викликати екстрену медичну допомогу.

Для виконання абдомінальних поштовхів стають позаду постраждалого, охоплюють його тулуб руками, розташовують кулак між пупком і нижнім краєм грудини, охоплюють кулак другою рукою та виконують різкий рух усередину і вгору.

Вагітним жінкам на пізніх термінах і людям із вираженим ожирінням замість абдомінальних виконують поштовхи в ділянці грудної клітки. Не слід сліпо вводити пальці в рот постраждалого. Видаляти стороннє тіло пальцями можна лише тоді, коли воно чітко видиме й легко доступне.

Якщо постраждалий знепритомнів, його обережно опускають на підлогу, викликають екстрену допомогу та розпочинають серцево-легеневу реанімацію. Перед виконанням вдихів оглядають ротову порожнину й видаляють тільки видимий предмет. Після успішного усунення обструкції постраждалий потребує медичного огляду, особливо якщо застосовувалися абдомінальні або грудні поштовхи *(МОЗ України, 2022; Merchant R. M. et al., 2020).*

Масивна зовнішня кровотеча є станом, при якому значний обсяг крові швидко витікає з рани. Вона може виникати при ушкодженнях кінцівок, шиї, пахвових, пахвинних і сідничних ділянок *(Шкатула Ю. В. та ін., 2020; МОЗ України, 2022).*

Ознаками масивної кровотечі можуть бути: інтенсивне або пульсуюче витікання крові; швидке утворення калюжі крові; просочування одягу кров'ю; травматична ампутація; погіршення свідомості; різка блідість, холодний піт, слабкість; прискорене дихання; ознаки шоку *(Шкатула Ю. В. та ін., 2020; Тарасюк В. С. та ін., 2017).*

Алгоритм допомоги:

1. Переконатися у безпеці та надягнути рукавички.
2. Викликати екстрену медичну допомогу або доручити це іншій особі.
3. Оголити місце ушкодження, за можливості розрізавши одяг.
4. Притиснути рану стерильною серветкою, бинтом або чистою тканиною.
5. Здійснювати сильний безперервний прямий тиск.
6. Якщо кровотеча зупинилася, накласти тугу тиснучу пов'язку.
7. Якщо кровотеча з кінцівки не припиняється або прямий тиск неможливий, накласти турнікет.
8. Для ран у пахвинній, пахвовій, сідничній ділянці або на шиї провести щільне тампонування рани та безперервно притискати її.
9. Контролювати стан постраждалого та запобігати переохолодженню.
10. Передати медичним працівникам інформацію про час і спосіб зупинки кровотечі *(МОЗ України, 2022; Шкатула Ю. В. та ін., 2020).*

Турнікет накладають вище місця кровотечі, але не на суглоб. Якщо рану добре видно, турнікет розміщують приблизно на 5-7 см вище її верхнього краю. Якщо огляд неможливий або ситуація небезпечна, його можна накласти максимально високо на кінцівку поверх одягу, уникаючи кишень та сторонніх

предметів. Турнікет затягують до повного припинення кровотечі. Слабко накладений турнікет неефективний і може посилити крововтрату *(Тарасюк В. С. та ін., 2017; Шкатула Ю. В. та ін., 2020).*

Час накладання необхідно чітко зафіксувати на турнікеті, шкірі постраждалого, записці або іншим доступним способом. Не можна закривати турнікет одягом чи пов'язкою, послаблювати або періодично знімати його до прибуття медичних працівників.

Тампонування застосовують при глибоких ранах, на які неможливо накласти турнікет. Рану щільно заповнюють гемостатичним або звичайним бинтом, починаючи з найглибшої ділянки, після чого сильно притискають. Якщо матеріал просочується кров'ю, його не виймають, а продовжують тиск або додають новий матеріал зверху *(Тарасюк В. С. та ін., 2017; Шкатула Ю. В. та ін., 2020).*

Після зупинки кровотечі постраждалого вкривають, заспокоюють і не дають йому їсти чи пити. Необхідно постійно контролювати свідомість і дихання, оскільки масивна крововтрата може швидко призвести до шоку та зупинки кровообігу *(Шкатула Ю. В. та ін., 2020).*

Короткочасна втрата свідомості може бути наслідком емоційного стресу, болю, тривалого перебування у вертикальному положенні, перегрівання, зневоднення або інших причин. Однак за втратою свідомості можуть приховуватися інсульт, порушення серцевого ритму, гіпоглікемія, внутрішня кровотеча, травма голови або інший небезпечний стан *(Григус І. М., Романишин М. Я., 2013; Петриченко Е. В., 2015).*

Якщо людина відчула слабкість, потемніння в очах, нудоту або запаморочення, її необхідно посадити або покласти, щоб запобігти падінню. Слід забезпечити доступ свіжого повітря, послабити тісний одяг і спостерігати за станом. Якщо постраждалий без свідомості, але нормально дихає:

1. Оцінюють безпеку.
2. Перевіряють свідомість і дихання.

3. Викликають екстрену медичну допомогу.

4. За відсутності ознак тяжкої травми переводять постраждалого у стабільне бокове положення.

5. Постійно контролюють дихання.

6. Захищають від переохолодження або перегрівання.

7. У разі припинення нормального дихання негайно розпочинають серцево-легеневу реанімацію.

Стабільне бокове положення забезпечує відкритість дихальних шляхів і знижує ризик потрапляння блювотних мас у дихальні шляхи. Проте при підозрі на травму хребта постраждалого без нагальної потреби не переміщують. Винятком є ситуація, коли неможливо підтримувати прохідність дихальних шляхів або місце події становить небезпеку *(МОЗ України, 2022; Крилюк В. О. та ін., 2017).* Не слід намагатися привести непритомного до тями ударами по обличчю, обливанням водою, піднесенням різких речовин до носа або примусовим даванням ліків і напоїв.

Інсульт виникає внаслідок гострого порушення мозкового кровообігу. Ефективність лікування значною мірою залежить від часу, тому основним завданням домедичної допомоги є швидке розпізнавання симптомів і негайний виклик екстреної медичної допомоги *(МОЗ України, 2022; Петриченко Т. В., 2015).*

Для первинного розпізнавання доцільно оцінити:

– обличчя: попросити постраждалого усміхнутися; асиметрія або опущення кута рота є небезпечною ознакою;

– руки: попросити підняти обидві руки; одна рука може опускатися або не підніматися;

– мовлення: попросити повторити просте речення; мова може бути нечіткою, незрозумілою або відсутньою;

– час: за наявності хоча б однієї ознаки необхідно негайно викликати 103.

Додатковими симптомами можуть бути раптове порушення зору, координації, рівноваги, сильний незвичний головний біль, оніміння або слабкість половини тіла, сплутаність свідомості.

Необхідно зафіксувати точний час появи перших симптомів або останній момент, коли людину бачили без цих проявів. Постраждалого укладають або розміщують у зручному положенні з дещо піднятою верхньою частиною тулуба, забезпечують спокій та доступ повітря. Не дозволяють ходити, не дають їжу, воду або ліки через можливе порушення ковтання. Не слід самостійно давати будь які препарати, оскільки без обстеження неможливо визначити вид інсульту.

За втрати свідомості контролюють дихання. Якщо воно нормальне – забезпечують безпечне положення; якщо відсутнє або ненормальне – розпочинають реанімацію *(МОЗ України, 2022).*

Гострий інфаркт міокарда виникає внаслідок критичного порушення кровопостачання серцевого м'яза. Найтиповішою ознакою є стискальний, пекучий або тиснучий біль за грудниною, який може поширюватися в ліву або обидві руки, плече, спину, шию, нижню щелепу чи верхню частину живота. Біль часто триває понад кілька хвилин, не минає у спокої або повторюється *(Петриченко, 2015; МОЗ України, 2022).* Іншими проявами можуть бути: раптова задишка; холодний піт; нудота або блювання; різка слабкість; тривога і страх смерті; запаморочення; блідість; порушення свідомості. У жінок, літніх людей і осіб із цукровим діабетом симптоми можуть бути нетиповими: виражена слабкість, задишка, нудота, біль у спині або животі без інтенсивного болю за грудниною.

Алгоритм домедичної допомоги:

1. Негайно припинити фізичне навантаження.
2. Надати постраждалому зручне напівсидяче положення.
3. Викликати 103 або 112.
4. Забезпечити спокій, послабити тісний одяг, відкрити вікно.

5. Постійно контролювати свідомість і дихання.

6. Допомогти прийняти лише ті препарати, які раніше були призначені лікарем саме цій людині для подібного стану.

7. Підготувати автоматичний зовнішній дефібрилятор, якщо він доступний.

8. У разі зупинки кровообігу негайно розпочати реанімацію.

Не можна дозволяти постраждалому самостійно йти до автомобіля або медичного закладу, навіть якщо біль зменшився, необхідне медичне обстеження *(МОЗ України, 2022).*

Судоми проявляються раптовими неконтрольованими скороченнями м'язів, порушенням або втратою свідомості. Причинами можуть бути епілепсія, травма голови, висока температура, отруєння, гіпоглікемія, інсульт, ураження електричним струмом та інші стани *(Григус І. М., Романишин М. Я., 2013; МОЗ України, 2022).* Під час судом необхідно:

1. Оцінити безпеку місця.

2. Прибрати предмети, об які людина може травмуватися.

3. Захистити голову м'яким предметом або складеним одягом.

4. Послабити одяг навколо шиї.

5. Зафіксувати час початку судом.

6. Не стримувати рухи постраждалого силою.

7. Не класти нічого до рота.

8. Не намагатися розтиснути щелепи.

9. Не давати воду, їжу або ліки під час нападу.

10. Після припинення судом перевірити дихання.

11. За наявності нормального дихання перевести людину у стабільне бокове положення та спостерігати за нею.

Екстрену медичну допомогу обов'язково викликають, якщо судоми виникли вперше, тривають понад п'ять хвилин, повторюються без відновлення

свідомості, виникли у вагітної, дитини, людини з цукровим діабетом, супроводжуються травмою, утопленням, отруєнням або порушенням дихання.

Після нападу людина може бути дезорієнтованою, сонливою, виснаженою або збудженою. Необхідно спокійно пояснити їй, що сталося, забезпечити приватність і не залишати саму до повного відновлення *(МОЗ України, 2022).*

Гіпоглікемія – небезпечне зниження рівня глюкози в крові, яке найчастіше виникає у людей із цукровим діабетом унаслідок надмірної дози інсуліну, пропуску їжі, інтенсивного фізичного навантаження або вживання алкоголю *(Петриченко Т. В., 2015; МОЗ України, 2022).*

Ознаками можуть бути: раптова слабкість; тремтіння; пітливість; виражене відчуття голоду; блідість; серцебиття; дратівливість; незвична поведінка; сплутаність мовлення; порушення координації; сонливість; судоми або втрата свідомості. Якщо людина при свідомості, адекватно реагує та може безпечно ковтати, їй дають швидкозасвоювані вуглеводи: солодкий напій, таблетки глюкози, цукор або інший доступний цукровмісний продукт. Після покращення стану доцільно дати їжу, що містить вуглеводи тривалішої дії, якщо це не затримує медичну допомогу. Якщо стан не покращується, симптоми повторюються або виникають порушення свідомості, необхідно викликати 103. Людині без свідомості нічого не дають через рот. За нормального дихання її переводять у стабільне бокове положення, а за відсутності нормального дихання розпочинають реанімацію. Використання спеціальних лікарських засобів можливе лише навченими особами відповідно до чинних протоколів і наявного оснащення *(МОЗ України, 2022).*

Анафілаксія – гостра системна алергічна реакція, що може швидко призвести до набряку дихальних шляхів, тяжкого порушення дихання, шоку та зупинки кровообігу. Причиною можуть бути лікарські засоби, харчові продукти, укуси комах, латекс та інші алергени. Небезпечними ознаками є: раптовий набряк губ, язика або горла; осиплість голосу; утруднений або

шумний вдих; свистяче дихання; задишка; генералізована кропив'янка; почервоніння та свербіж шкіри; запаморочення; різка слабкість; падіння артеріального тиску; втрата свідомості *(Григус І. М., Романишин М. Я., 2013; МОЗ України, 2022).*

Шкірні прояви можуть бути відсутні, тому вирішальним є гостре порушення дихання або кровообігу після контакту з імовірним алергеном. Алгоритм допомоги:

1. Припинити дію алергену, якщо це можливо і безпечно.
2. Негайно викликати екстрену медичну допомогу.
3. Допомогти постраждалому використати власний автоін'єктор адреналіну, якщо він є і особа навчена його застосовувати.
4. При вираженій слабкості покласти постраждалого, не дозволяючи йому раптово вставати.
5. За значного утруднення дихання надати положення сидячи або напівсидячи.
6. Вагітну бажано покласти на лівий бік.
7. Постійно контролювати дихання та свідомість.
8. Підготуватися до проведення серцево-легеневої реанімації.

Не слід залишати постраждалого самого навіть після тимчасового покращення, оскільки симптоми можуть поновитися *(МОЗ України, 2022; Perkins eG. D. t al., 2021).*

При термічному опіку насамперед припиняють дію високої температури: відводять постраждалого від джерела вогню, гасять одяг, відключають нагрівальний прилад або усувають інший небезпечний чинник. Необхідно пам'ятати про власну безпеку, особливо в умовах пожежі та задимлення *(Григус І. М., Романишин М. Я., 2013; МОЗ України, 2022).*

Алгоритм допомоги:

1. Припинити дію термічного чинника.

2. Викликати екстрену медичну допомогу при великих, глибоких або небезпечно розташованих опіках.

3. Зняти прикраси, годинник і вільний одяг поблизу ураження до розвитку набряку.

4. Не відривати тканину, що прилипла до шкіри.

5. Охолоджувати опік прохолодною проточною водою.

6. Не допускати загального переохолодження постраждалого.

7. Після охолодження накрити ушкодження стерильною сухою неприлипаючою пов'язкою або чистою плівкою.

8. Контролювати свідомість і дихання.

Не можна прикладати до опіку лід, мастило, олію, крем, сметану, спиртові розчини, зубну пасту або інші побутові засоби. Не слід проколювати пухирі та знімати ушкоджену шкіру. Обов'язкового медичного огляду потребують опіки обличчя, шиї, дихальних шляхів, кистей, стоп, статевих органів, великих суглобів, циркулярні опіки кінцівок або тулуба, електричні й хімічні ураження, а також опіки значної площі. Особливо небезпечними є ознаки інгаляційного ушкодження: опіки обличчя, кіптява навколо носа або рота, осиплість голосу, кашель, задишка після перебування в задимленому приміщенні *(МОЗ України, 2022)*.

Тепловий удар виникає внаслідок перегрівання організму та порушення механізмів терморегуляції. Його можливими ознаками є гаряча шкіра, сильна слабкість, головний біль, нудота, порушення координації, сплутаність свідомості, судоми або непритомність *(Петриченко, 2015; МОЗ України, 2022)*.

Постраждалого переміщують у прохолодне затінене місце, знімають зайвий одяг і розпочинають активне охолодження: змочують шкіру прохолодною водою, забезпечують обдування, прикладають холодові пакети через тканину до шиї, пахвових і пахвинних ділянок. Екстрену медичну допомогу викликають негайно. Людині з порушеною свідомістю не дають пити. При втраті нормального дихання розпочинають реанімацію.

Переохолодження характеризується зниженням температури тіла та порушенням функцій життєво важливих органів. Спочатку виникають сильне тремтіння, блідість, уповільнення рухів і мовлення, надалі – сонливість, сплутаність свідомості, зменшення або припинення тремтіння, уповільнення дихання. Допомога передбачає: переміщення у сухе захищене місце; обережне поводження з постраждалим; зняття мокрого одягу; укутування сухими ковдрами; поступове зігрівання тулуба; виклик екстреної допомоги; постійний контроль дихання.

Не можна інтенсивно розтирати шкіру, занурювати людину у дуже гарячу воду, давати алкоголь або змушувати активно рухатися. При відмороженні уражену ділянку захищають сухою пов'язкою, не масажують і не проколюють пухирі *(МОЗ України, 2022).*

Травми голови, хребта та кінцівок. При будь-якій травмі передусім усувають безпосередню загрозу життю: відновлюють прохідність дихальних шляхів, зупиняють масивну кровотечу, оцінюють дихання. Лише після цього переходять до місцевого огляду ушкоджень *(Тарасюк В. С. та ін., 2017; МОЗ України, 2022).*

Ознаками небезпечної травми голови можуть бути: втрата або порушення свідомості; повторне блювання; сильний головний біль; судоми; порушення мовлення, зору або координації; витікання крові чи прозорої рідини з носа або вуха; різний розмір зіниць; слабкість кінцівок; погіршення стану після тимчасового покращення. Постраждалого не залишають самого, не дають їжу, воду або ліки, не дозволяють вставати. За наявності рани накладають пов'язку, але не тиснуть безпосередньо на ділянку можливого вдавленого перелому черепа або сторонній предмет.

Пошкодження хребта слід підозрювати після падіння з висоти, дорожньо-транспортної пригоди, пірнання, сильного удару по голові, шиї або спині, а також за наявності болю у шиї чи спині, порушення чутливості, слабкості або паралічу кінцівок. Постраждалого не переміщують без нагальної потреби.

Голову підтримують руками в нейтральному положенні, не намагаючись силоміць виправити деформацію. Пріоритетом залишається забезпечення дихання.

Ознаками перелому кінцівки є біль, набряк, деформація, порушення руху, патологічна рухливість, рана з видимими фрагментами кістки. Кінцівку залишають у тому положенні, в якому її виявили, і за можливості фіксують, не намагаючись вправити перелом. Шину накладають лише особи, які володіють відповідною технікою. При відкритому переломі спочатку зупиняють кровотечу, накладають стерильну пов'язку й лише потім здійснюють іммобілізацію. Кровообіг і чутливість нижче місця травми перевіряють до та після фіксації.

При сторонньому предметі в рані його не виймають. Предмет фіксують навколо об'ємними пов'язками, запобігаючи рухам, і викликають екстрену допомогу *(МОЗ України, 2022; Тарасюк В. С. та ін., 2021).*

При підозрі на отруєння головним принципом є недопущення контакту рятувальника з токсичною речовиною. Не можна входити у приміщення з невідомим газом, димом або парами без спеціального захисту *(Волянський П. Б. та ін., 2020; МОЗ України, 2022).*

Алгоритм дій:

1. Оцінити безпеку місця.
2. Припинити контакт із речовиною лише тоді, коли це безпечно.
3. Викликати 103 або 112.
4. Зберегти упаковку, етикетку, залишки речовини або інформацію про неї для медичних працівників.
5. При потраплянні речовини на шкіру зняти забруднений одяг і промивати шкіру водою, якщо це не суперечить властивостям речовини.
6. При потраплянні в очі негайно промивати їх великою кількістю чистої води.
7. Контролювати свідомість і дихання.

8. За втрати свідомості та збереженого дихання забезпечити стабільне положення *(МОЗ України, 2022).*

9. За відсутності нормального дихання розпочати реанімацію, уникаючи прямого контакту з токсичною речовиною.

Не можна самостійно викликати блювання, давати молоко, алкоголь, олію, сорбенти, нейтралізувальні розчини або лікарські засоби без вказівки медичного фахівця чи диспетчера. Особливо небезпечними є отруєння кислотами, лугами, нафтопродуктами, невідомими газами та речовинами, що спричиняють порушення свідомості *(Григус І. М., Романишин М. Я., 2013; МОЗ України, 2022).*

Ураження електричним струмом або блискавкою. До постраждалого не можна торкатися, доки дію електричного струму не припинено. Необхідно вимкнути джерело живлення, від'єднати прилад або дочекатися фахівців. При високовольтному ураженні наближатися до місця події небезпечно навіть без безпосереднього контакту з проводом.

Після припинення дії струму:

1. Перевіряють свідомість і дихання.
2. Викликають екстрену медичну допомогу.
3. За відсутності нормального дихання розпочинають реанімацію.
4. Якнайшвидше застосовують автоматичний зовнішній дефібрилятор *(МОЗ України, 2022).*
5. Оглядають тіло на наявність опіків і травм від падіння.
6. Накривають опікові поверхні сухими стерильними пов'язками *(Григус І. М., Романишин М. Я., 2013; МОЗ України, 2022).*
7. Постійно спостерігають за постраждалим.

Навіть за задовільного самопочуття після електротравми необхідне медичне обстеження через ризик порушень серцевого ритму та прихованих ушкоджень. При ураженні блискавкою постраждалий не накопичує

електричний заряд, тому до нього можна безпечно торкатися після оцінки зовнішніх ризиків.

Допомогу на воді повинна здійснювати лише особа, яка має відповідну підготовку й обладнання. Не слід входити у воду без оцінювання ризику. Безпечніше подати постраждалому предмет, мотузку, рятувальний круг або використати плавзасіб. Після вилучення з води:

1. Перевіряють свідомість і дихання.
2. Викликають 103 або 112.
3. Якщо дихання відсутнє або ненормальне, негайно розпочинають серцево-легеневу реанімацію.
4. Особливо важливими при утопленні є штучні вдихи, оскільки зупинка кровообігу часто має асфіктичне походження.
5. Застосовують автоматичний зовнішній дефібрилятор, висушивши грудну клітку перед наклеюванням електродів *(МОЗ України, 2022; Olasveengen T. M. et al., 2021).*
6. Якщо людина без свідомості, але нормально дихає, її переводять у стабільне бокове положення.
7. Знімають мокрий одяг, укривають і запобігають переохолодженню.

Не слід витрачати час на спроби «видалити воду з легень», піднімати постраждалого за ноги або натискати на живіт. Такі дії затримують вентиляцію та компресії. Навіть після відновлення свідомості й дихання людина потребує медичного огляду через можливість пізніх дихальних ускладнень. Утоплення включено як до порядків МОЗ України, так і до сучасних міжнародних рекомендацій щодо особливих обставин реанімації *(Perkins G. D. et al., 2021; Кабінет Міністрів України, 2012).*

Сучасні алгоритми домедичної допомоги ґрунтуються на кількох універсальних принципах: безпеці рятувальника, ранньому розпізнаванні критичного стану, швидкому виклику екстреної медичної допомоги, усуненні безпосередніх загроз життю, безперервному спостереженні та своєчасному

передаванні постраждалого медичним працівникам. Національні порядки, затверджені наказом МОЗ України № 441, охоплюють основні травматичні й нетравматичні невідкладні стани та встановлюють стандартизовану послідовність дій осіб без медичної освіти *(МОЗ України, 2022).*

Міжнародні рекомендації 2021 року підтверджують першочергове значення раннього розпізнавання зупинки кровообігу, негайного початку високоякісних компресій грудної клітки, мінімізації перерв, проведення вентиляції навченими особами та якнайшвидшого застосування автоматичного зовнішнього дефібрилятора. Водночас ефективність будь-якого алгоритму залежить від практичної готовності людини застосувати його у стресовій ситуації. Саме тому підготовка майбутніх фахівців має поєднувати теоретичне засвоєння нормативних положень із регулярним відпрацюванням навичок на манекенах, використанням симуляційних сценаріїв, ситуаційних завдань і періодичним оновленням компетентностей *(Greif R. et al., 2021; МОЗ України, 2022).*

Формування професійних компетентностей щодо надання першої домедичної допомоги є важливою складовою підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальностями А7 Фізична культура і спорт та 262 Правоохоронна діяльність. Спільною для обох освітніх програм є необхідність підготувати майбутнього фахівця до своєчасного розпізнавання невідкладного стану, оцінювання безпеки місця події, виклику екстрених служб, виконання базових рятувальних заходів та передавання постраждалого медичним працівникам. Водночас зміст, умови застосування та професійна спрямованість таких компетентностей мають суттєві відмінності, зумовлені характером майбутньої діяльності.

В освітній програмі спеціальності А7 Фізична культура і спорт здатність надавати домедичну допомогу пов’язана насамперед із забезпеченням безпеки учасників освітнього, оздоровчого, тренувального та змагального процесів. Програмний результат навчання (ПРН) 16 – «Надавати долікарську медичну

допомогу при невідкладних станах та патологічних процесах в організмі людини» передбачає формування у здобувачів не лише теоретичних знань, а й практичної готовності діяти при травмах, раптовій зупинці кровообігу, порушенні дихання, теплових ураженнях, непритомності, судомах, гіпоглікемії та інших станах, можливих під час рухової активності.

Формування цієї компетентності має здійснюватися у взаємозв'язку з освітніми компонентами медико-біологічного та професійно-практичного спрямування. Знання з анатомії та фізіології людини забезпечують розуміння будови й функціонування органів і систем, механізмів виникнення травм та патологічних станів. Спортивна фізіологія дає змогу оцінювати реакції організму на фізичне навантаження, розрізняти нормальну втому і небезпечне погіршення стану, своєчасно виявляти ознаки перевантаження, теплового удару, гіпоглікемії або гострих серцево-судинних порушень. Спортивна медицина та дисципліни з безпеки професійної діяльності формують знання про профілактику травматизму, первинну оцінку стану спортсмена, алгоритми допомоги та критерії припинення фізичного навантаження.

Практична спрямованість підготовки майбутнього фахівця з фізичної культури і спорту має враховувати специфіку спортивного середовища. Невідкладний стан може виникнути на спортивному майданчику, у тренажерному залі, басейні, на стадіоні, під час туристичного заходу або змагань. Тому здобувач повинен навчитися діяти за умов обмеженого часу, емоційного напруження, присутності інших учасників і необхідності одночасно організувати безпечний простір *(Greif R. et al., 2021).*

Для спеціальності 262 Правоохоронна діяльність компетентність із надання допомоги має ширший і більш ризик-орієнтований характер. ПРН 19 – «Надавати невідкладну, зокрема домедичну і медичну, допомогу» пов'язаний із професійною діяльністю в умовах дорожньо-транспортних пригод, насильницьких дій, поранень, масових заворушень, надзвичайних ситуацій,

обстрілів, мінно-вибухових уражень та інших подій із високим рівнем небезпеки.

На відміну від фахівця сфери фізичної культури і спорту, працівник правоохоронних органів може надавати допомогу в умовах, коли небезпека ще не усунена. Тому першочергового значення набувають ситуаційна обізнаність, оцінювання загроз, використання засобів індивідуального захисту, забезпечення контролю місця події та визначення безпечного маршруту евакуації. Майбутній правоохоронець повинен уміти поєднувати виконання службових завдань із невідкладними заходами щодо збереження життя постраждалого.

Формування відповідної компетентності має бути інтегроване з освітніми компонентами, пов'язаними з тактико-спеціальною підготовкою, особистою безпекою, цивільним захистом, вогневою підготовкою, криміналістикою, адміністративною та службовою діяльністю. Тактико-спеціальна підготовка забезпечує здатність діяти в небезпечному середовищі, організовувати взаємодію та евакуацію. Дисципліни з правових засад професійної діяльності формують розуміння прав, обов'язків і меж відповідальності особи, яка надає допомогу. Підготовка з особистої безпеки сприяє засвоєнню принципу, відповідно до якого допомога не повинна створювати додаткової загрози для самого рятувальника, постраждалого та оточуючих.

Особливе місце у підготовці правоохоронців має посідати допомога при масивній кровотечі, проникаючих пораненнях, травматичній ампутації, ушкодженнях грудної клітки, синдромі тривалого здавлення та мінно-вибухових травмах. Необхідним є практичне відпрацювання прямого тиску на рану, тампонування, накладання турнікета, фіксації часу його застосування, переведення постраждалого у безпечне положення та підготовки до евакуації. Такі навички мають формуватися в умовах, максимально наближених до професійних: з використанням засобів захисту, обмеженої видимості, шумового

супроводу, дефіциту часу та командної взаємодії *(Тарасюк В. С. та ін., 2017; Шкатула Ю. В. та ін., 2020).*

Попри професійні відмінності, структура компетентності з надання домедичної допомоги для обох спеціальностей може бути представлена як поєднання п'яти взаємопов'язаних компонентів:

– Когнітивний компонент охоплює знання ознак невідкладних станів, послідовності первинного обстеження, алгоритмів серцево-легеневої реанімації, зупинки кровотечі, забезпечення прохідності дихальних шляхів, допомоги при травмах, опіках, інсульті, анафілаксії, судомах та інших станах. До нього також належить знання нормативно-правових засад надання домедичної допомоги.

– Операційно-діяльнісний компонент передбачає здатність правильно виконувати практичні дії: оцінювати свідомість і дихання, проводити компресії грудної клітки, використовувати автоматичний зовнішній дефібрилятор, накладати пов'язки й турнікет, тампонувати рану, переводити постраждалого у стабільне бокове положення та контролювати його стан.

– Ситуаційно-аналітичний компонент характеризує здатність швидко оцінювати обстановку, визначати пріоритетну загрозу життю, обирати відповідний алгоритм і коригувати дії залежно від зміни стану постраждалого. Для майбутніх фахівців фізичної культури це може бути рішення про припинення тренування або виклик медичної служби, а для правоохоронців – одночасне забезпечення безпеки місця події та зупинка критичної кровотечі.

– Комунікативно-організаційний компонент включає вміння чітко повідомляти диспетчеру екстреної медичної допомоги необхідну інформацію, розподіляти обов'язки між присутніми, підтримувати контакт із постраждалим, взаємодіяти з колегами та передавати медичним працівникам дані про стан людини й виконані заходи.

– Особистісно-психологічний компонент охоплює відповідальність, стресостійкість, рішучість, самоконтроль, емпатію та готовність діяти в умовах невизначеності. Наявність знань без психологічної готовності не гарантує

ефективного надання допомоги, тому освітній процес має передбачати поступове ускладнення ситуаційних завдань і формування впевненості у власних діях *(Greif R. et al., 2021).*

Ефективність формування професійних компетентностей залежить від методів організації навчання. Традиційне лекційне подання матеріалу є недостатнім, оскільки не забезпечує автоматизованого виконання дій у критичній ситуації. Основу підготовки повинні становити практичні заняття, симуляційне навчання, ситуаційні задачі, рольові сценарії, робота з манекенами, тренажерами й навчальними автоматичними дефібриляторами *(Greif et al., 2021).*

Для здобувачів спеціальності А7 Фізична культура і спорт доцільно застосовувати сценарії, пов'язані з падінням спортсмена, травмою суглоба, раптовою втратою свідомості під час тренування, тепловим ударом на стадіоні, утопленням у басейні або гіпоглікемією у відвідувача фітнес-центру. Здобувач повинен не лише виконати необхідні маніпуляції, а й організувати інших учасників, припинити заняття та забезпечити доступ медичної бригади до постраждалого.

Для здобувачів спеціальності 262 Правоохоронна діяльність ефективними є сценарії дорожньо-транспортної пригоди, поранення, масової події, виявлення непритомної особи, мінно-вибухового ураження або евакуації з небезпечної зони. Практичні завдання мають включати оцінювання ризиків, використання засобів індивідуального захисту, командну взаємодію, передачу інформації та виконання алгоритмів за умов дефіциту часу.

Важливим принципом є поетапність підготовки. На першому етапі здобувачі засвоюють поняття, ознаки невідкладних станів і нормативні алгоритми. На другому – відпрацьовують окремі практичні навички. На третьому – поєднують їх у цілісний алгоритм. На четвертому – виконують сценарії, наближені до професійної діяльності. На п'ятому – проходять об'єктивне оцінювання та аналізують допущені помилки *(Greif R et al., 2021).*

Оцінювання компетентності має охоплювати не лише правильність окремої маніпуляції, а й повноту професійної поведінки. До критеріїв доцільно віднести оцінювання безпеки, правильність розпізнавання стану, своєчасність виклику екстреної допомоги, послідовність дій, техніку виконання практичних навичок, комунікацію, командну взаємодію та контроль стану постраждалого. Найбільш доцільним є використання стандартизованих чек-листів і практичного іспиту за типом об'єктивного структурованого оцінювання навичок *(Greif R. et al., 2021).*

Суттєвою особливістю домедичної підготовки є необхідність регулярного повторення. Практичні навички з часом погіршуються, особливо якщо не застосовуються у повсякденній діяльності. Тому до освітніх програм доцільно включати короткі повторювальні тренування, міждисциплінарні практичні заняття та контрольні сценарії протягом усього періоду навчання, а не обмежувати підготовку одним освітнім компонентом *(Greif R. et al., 2021).*

Відтак, формування професійних компетентностей щодо надання першої домедичної допомоги має будуватися на інтеграції нормативно-правових знань, медико-біологічної підготовки, практичних навичок, ситуаційного мислення та психологічної готовності *(Greif R. et al., 2021; МОЗ України, 2022).*

Висновки. Установлено, що надання першої домедичної допомоги є важливою складовою системи громадського здоров'я, безпеки життєдіяльності та професійної підготовки здобувачів вищої освіти. Її значення полягає у своєчасному розпізнаванні невідкладного стану, підтриманні життєво важливих функцій постраждалого, запобіганні ускладненням і забезпеченні безпечної передачі людини бригаді екстреної медичної допомоги.

З'ясовано, що формування компетентностей із надання першої домедичної допомоги є необхідною умовою професійної готовності майбутніх фахівців спеціальностей А7 Фізична культура і спорт та 262 Правоохоронна діяльність.

Охарактеризовано нормативно-правові засади організації домедичної допомоги в Україні та розкрито сучасні алгоритми надання першої домедичної допомоги, що передбачають оцінювання безпеки місця події, перевірку свідомості й дихання, виявлення масивної кровотечі, виклик екстреної медичної допомоги, виконання невідкладних рятувальних заходів, постійний контроль стану постраждалого та передавання інформації медичним працівникам. ,

Обґрунтовано, що формування професійних компетентностей щодо надання першої домедичної допомоги має здійснюватися на основі компетентнісного, практико-орієнтованого та міждисциплінарного підходів. Така компетентність включає когнітивний, операційно-діяльнісний, ситуаційно-аналітичний, комунікативно-організаційний та особистісно-психологічний компоненти. Ефективна підготовка повинна поєднувати теоретичне засвоєння нормативних положень із практичним відпрацюванням алгоритмів дій, симуляційними сценаріями, ситуаційними завданнями, роботою з манекенами, навчальними дефібриляторами, турнікетами та іншими засобами домедичної допомоги.

Отже, теоретичні та практичні засади надання першої домедичної допомоги мають важливе значення для формування професійних компетентностей здобувачів вищої освіти. Інтеграція чинної нормативно-правової бази України, міжнародних рекомендацій, сучасних алгоритмів дій і практико-орієнтованого навчання сприяє підготовці фахівців, здатних швидко, послідовно, безпечно й відповідально діяти у невідкладних ситуаціях. Такий підхід підвищує рівень безпеки освітнього, спортивного та службового середовища, забезпечує готовність майбутніх фахівців до професійної діяльності та сприяє збереженню життя і здоров’я людини.

References:

Волянський П. Б., Гринзовський А. М., Гур'єв С. О. та ін. «Домедична допомога на місці події». *Практичний посібник ДСНС України, Херсон : Видавничий дім «Гельветика»,* 2020, 224 с., URL: https://surl.li/rkvsrn

Григус І. М., Романишин М. Я. Перша медична допомога : підручник. *Львів : Новий Світ-2000,* 2013. 176 с. URL: https://surl.li/kbfqpk

Екстрена медична допомога (догоспітальні протоколи): посібник / за редакцією професора О.В. Богомолець, професора Г.Г. Рощіна. *Київ. Юстон*. 2016. 212 с. URL: https://surl.li/gywfjh

Крилюк В.О., Кузьмін В.Ю., Кузьмінський І.В., Максименко М.А., Цимбалюк Г.Ю. Домедична допомога (алгоритми та маніпуляції) : навчальний посібник. *Київ : Всеукраїнська рада реанімації та екстреної допомоги,* 2017. 120 с. URL: https://surl.li/bazhvv

Закон України №5081-VI від 09.12.2015 р. «Про екстрену медичну допомогу». URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5081-17. (дата звернення: 23.07.2026).

Петриченко Т. В. Перша медична допомога. *Підручник. Київ: Медицина,* 2015. 272 с. URL: https://surl.li/rgaimb

Про екстрену медичну допомогу : Закон України від 05.07.2012 № 5081-VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5081-17 Закон України №5081-VI від 09.12.2015 р. «Про екстрену медичну допомогу». - Режим доступу: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5081-17. Про затвердження порядків надання домедичної допомоги особам при невідкладних станах : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.03.2022 № 441. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0356-22 (дата звернення: 23.07.2026).

Про затвердження Порядку підготовки та підвищення кваліфікації осіб, які зобов'язані надавати домедичну допомогу : Постанова Кабінету Міністрів України від 21.11.2012 № 1115. URL: https://surl.li/woaoxk (дата звернення: 23.07.2026).

Тарасюк В. С., Матвійчук М. В., Паламар І. Б. та ін. Перша медична (екстрена) допомога з елементами тактичної медицини на догоспітальному етапі в умовах надзвичайних ситуацій : навч. посіб. / за ред. В. С. Тарасюка. 2-ге вид., випр. Київ : ВСВ «Медицина», 2017. 368 с. URL: https://surl.li/ofdnlr

Шкатула Ю. В., Ткач Г. Ф., Гарбузова В. Ю., Бадіон Ю. О. Кровотеча. Крововтрата. Екстрена медична допомога : навчальний посібник. *Суми : Сумський державний університет,* 2020. 131 с. URL: https://surl.li/yxlrhn

World Health Organization. Injuries and violence. Geneva : WHO. URL: https://surl.li/svrrtv (дата звернення: 23.07.2026).

World Health Organization. Health Cluster Ukraine. URL: Ukraine Health Cluster (дата звернення: 23.07.2026).

Perkins G. D., Graesner J. T., Semeraro F., et al. European Resuscitation Council Guidelines 2021: Executive summary. *Resuscitation.* 2021. Vol. 161. P. 1-60. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2021.02.003.

Olasveengen T. M., Semeraro F., Ristagno G., et al. European Resuscitation Council Guidelines 2021: Basic Life Support. Resuscitation. 2021. Vol. 161. P. 98–114. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2021.02.009.

Merchant R. M., Topjian A. A., Panchal A. R., et al. Part 1: Executive Summary: 2020 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation*. 2020. Vol. 142 (Suppl. 2). S337-S357. DOI: https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000918.

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-525
UDC 378.147:61:37.091.33

CHAPTER 15.
THE CASE-BASED LEARNING IN THE FORM OF A PEER ROLE-PLAY IN MEDICAL EDUCATIONTHE

Halyna SALTYKOVA
PhD, Associate Professor
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Educational scientific center «Institute of biology and medicine» ,
Department of Pediatrics, Obstetrics and Gynecology
(Volodymyrska Street 64/13, City of Kyiv, Ukraine, 01601)
halyna.saltykova@knu.ua
https://orcid.org/0000-0001-7064-626X

Annotation. This section examines the theoretical, methodological, and practical aspects of using the case method in a role-playing format within higher medical education. It highlights the method's capacity to align with educational concepts focused on case-based learning, simulation-based education experiential learning, peer learning, and reflective learning. The text substantiates the method's potential to foster clinical reasoning, professional communication, interdisciplinary teamwork, professional identity, and the ability to make decisions amidst information scarcity and clinical uncertainty. It details the methodological steps for constructing a clinical case, developing role cards, facilitating the scenario, conducting debriefing, and performing assessment. A clinical role-play scenario is presented—designed for final-year medical students—to practice the physician's management algorithm for acute abdominal pain in a child. The section also analyzes the method's limitations, resource requirements, and psychological and ethical aspects—comparing it with other approaches—as well as the specific role of the teacher-facilitator. A synthesis of data from recent reviews indicates the high educational potential of role-play simulation; however, its effectiveness depends on sound instructional design and high-quality debriefing.

Keywords: simulation-based education, medical education, competencies, debriefing, case algorithm

КЕЙС-МЕТОД НАВЧАННЯ У ФОРМАТІ РОЛЬОВОЇ ГРИ В МЕДИЧНІЙ ОСВІТІ

Анотація *(Muthuraman S., Veerasamy R., Nabila T. Ch., 2020).* У цьому розділі розглянуто теоретичні та практичні питання використання кейс-методу у формі рольової гри під час підготовки майбутніх лікарів. Показано, як цей підхід може поєднуватися з навчанням на основі клінічних випадків, симуляційним, досвідним, взаємним і рефлексивним навчанням.

Особливу увагу приділено можливостям рольової гри у розвитку клінічного мислення та професійних навичок студентів. Зокрема, її використання дає змогу відпрацьовувати професійну комунікацію, взаємодію в команді, прийняття клінічних рішень, а також дії в ситуаціях, коли лікар має неповну інформацію або стикається з невизначеністю. Такий формат навчання також сприяє поступовому формуванню професійної позиції та усвідомленню майбутньої ролі лікаря.

Окремий розділ присвячено практичній організації рольової гри. Послідовно описано підготовку клінічного кейсу, визначення навчальних цілей, створення рольових карток, проведення сценарію, роботу викладача-фасилітатора, а також подальший дебрифінг і оцінювання результатів. Як приклад наведено сценарій рольової гри для студентів випускних курсів, присвячений веденню дитини з гострим абдомінальним болем. Сценарій спрямований на відпрацювання послідовності дій лікаря — від первинної оцінки стану дитини та збору анамнезу до формування попереднього діагнозу й визначення подальшої тактики.

Водночас розглянуто й певні труднощі застосування цього методу. Рольова гра потребує часу, відповідної підготовки викладача та студентів, продуманого сценарію й організаційних ресурсів. Важливими залишаються також психологічні та етичні аспекти, зокрема створення безпечної атмосфери для участі студентів і помилок у процесі навчання. Окремо розглянуто роль викладача, який у такому форматі виступає не лише джерелом інформації, а насамперед організатором і фасилітатором навчального процесу.

Аналіз сучасних систематичних оглядів показує, що кейс-метод, рольова та симуляційна освіта мають значні можливості для підготовки майбутніх медичних працівників. Водночас сам факт використання рольової гри не гарантує високої ефективності навчання. Результат значною мірою визначається тим, наскільки чітко сформульовані навчальні цілі, продуманий клінічний сценарій, організована робота студентів і проведений підсумковий дебрифінг.

Такий варіант звучить менш канцелярськи, має більш природний перехід між абзацами й водночас зберігає академічний стиль, придатний для монографії.

Ключові слова: симуляційна освіта, медична освіта, компетентності, дебрифінг, алгоритм кейсу

Вступ. Одним із ключових завдань вищої медичної освіти є навчити майбутнього лікаря застосовувати отримані академічні знання у реальних клінічних ситуаціях. На відміну від стандартних тестових завдань, у повсякденній практиці лікар далеко не завжди має повну й однозначну інформацію про стан пацієнта. Клінічна картина може бути неповною, суперечливою або змінюватися в процесі спостереження, тому рішення часто доводиться приймати ще до отримання всіх результатів лабораторних та інструментальних досліджень.

Водночас робота лікаря не обмежується лише аналізом клінічних даних. Під час обстеження та лікування необхідно спілкуватися з пацієнтом і його родиною, пояснювати свої рішення, враховувати їхні побоювання, а також взаємодіяти з іншими членами медичної команди. Саме поєднання клінічного мислення, прийняття рішень, комунікації та командної роботи значною мірою визначає рівень професійної компетентності майбутнього лікаря.

Класична лекційно-семінарська система забезпечує фундаментальну теоретичну базу, проте не створює достатнього простору для моделювання активних дій майбутнього фахівця. Обмежений доступ до пацієнтів на клінічних базах університетів з різних причин, іноді використання дистанційних методів освіти та необхідність збільшення кількості реалістичних кейсів , вимагає активного використання методів симуляційного навчання.

Кейс-метод навчання (*case-based learning*, CBL) допомагає перейти від пасивного засвоєння навчального матеріалу до його застосування в конкретних клінічних ситуаціях. Додавання елементів рольової гри (*peer role-play*) робить цей підхід ще більш практично орієнтованим. Студент уже не просто аналізує опис захворювання чи окремі дані про пацієнта, а бере на себе певну професійну роль і має діяти відповідно до неї. Таким чином, навчальна ситуація наближається до реальної клінічної практики, де важливо не лише правильно визначити проблему, а й уміти спілкуватися, приймати рішення та обґрунтовувати власні дії..

Сучасний огляд літератури підтверджує доцільність такого підходу, але водночас застерігає від спрощення. Якісно зпроектований CBL сприяє розвитку критичного мислення, аналізу клінічних ситуацій, командної роботи та комунікації, однак не за всіма показниками має перевагу над іншими активними методами *(Cook D.A at all,2011; Thistlethwaite J.E.,2012).* Peer role-play високо оцінюється студентами й може покращувати комунікативні навички, але не демонструє стабільної переваги над іншими видами симуляції *(Ziv A. at all, 2020).*

Отже, педагогічна цінність методу залежить не від назви технології і її спрямованості, а від педагогічної грамотності її дизайну та чіткості викладацької фасилітації.

Для викладача клінічної кафедри цей інструмент — чудовий спосіб навчити студентів приймати рішення у складних ситуаціях, знизити тривогу перед роботою з непростими пацієнтами, навчитися працювати в команді та чітко розуміти межі своєї компетентності.

У безпечному середовищі, без жодного ризику для реального пацієнта, студенти вчаться найголовнішому: правильно ставити запитання, заспокоювати тривожних батьків, пояснювати подальший план дій, розподіляти завдання між колегами, відкрито визнавати невизначеність і вчасно просити про допомогу.

Поняття про case-based learning (CBL). CBL передбачає структурування навчального процесу навколо реалістичної клінічної ситуації, що потребує диференційної діагностики та обґрунтування лікувальної тактики. CBL важливо відрізняти від проблемно – орієнтованого навчання (problem-based learning (PBL)). У PBL проблема є механізмом самостійного визначення навчальних потреб, тоді як CBL зазвичай має більш чітко визначені викладачем цілі. Рольова гра додає до CBL поведінковий компонент: студент повинен не лише пояснити, яке рішення є правильним, а продемонструвати, як він його реалізує через комунікацію та дію.

За даними метааналізу X.-Y. Cen та співавт 2021р (включено 939 здобувачів у 8 дослідженнях)визначено, що впровадження CBL вірогідно підвищує рівень академічної успішності та якість аналізу клінічних випадків. Систематичний огляд 2025 року також підтверджує вищі показники критичного мислення у студентів за умов використання CBL порівняно з традиційними лекціями, водночас автори наголосили на потребі більш якісних рандомізованих досліджень *(Varma B. at all,, 2025).* Водночас огляд R. Daly та співавт. наголошує: вирішальними чинниками успіху методу є автентичність кейсу, експертна фасилітація клініцистом та забезпечення психологічно безпечного освітнього середовища *(Daly R. at all, 2025).*

Отже, кейс слід розглядати як педагогічний сценарій, а не просто як текст клінічної історії. Хороший кейс містить проблему, невизначеність, можливість прийняття рішення та наслідок цього рішення. У рольовому форматі до цих компонентів додається людський фактор.Нижче наведене порівняння різних методів навчання , таблиця 1 .

Таблиця 1.

Порівняння різних методів навчання здобувачів освіти за медичним спрямуванням

Метод	**Основна мета**	**Необхідні ресурси**	**Основний фокус розвитку навичок**
Case-Based Learning (CBL) навчання орієнтоване на клінічний випадок	Аналіз анамнезу та вибір діагностично-лікувальної тактики	Мінімальні (кейс,фасилітатор)	Клінічне мислення, аналіз даних
Problem-Based Learning (PBL) Проблемно орієнтоване навчання	Самостійне визначення прогалин у знаннях та пошук рішень	Тьютор, доступ до бібліотеки	Самостійне навчання, базові науки
Role-Play (Рольова гра)	Відпрацювання взаємодії, комунікації та командних ролей	Мінімальні (сценарій, студентські ролі)	Комунікація, емпатія, командна робота
Standardized Patient (SP) Стандартизований пацієнт	Стандартизована оцінка клінічних та комунікативних навичок	Високі (оплата акторів, тренінг)	Збір анамнезу, консультація, OSCE
High-Fidelity Simulation Високореалістичне моделювання	Маніпуляційні навички, екстрена допомога, критичні стани	Дуже високі (манекени, симуляційні центри)	Бригадна робота, технічні алгоритми

Джерело: створено автором з використанням джерел (Nestel D,2007, Cleland JA, 2009, Dalwood N 2020)

Сучасні метааналізи підтверджують високу ефективність симуляційного навчання та кейс-методів у медичній освіті. *(Cant R.P. at all, 2010; Chernikova O., 2020; Cook D.A.,2011; Cen X-Y.,2011).* Але коли який доречно обирати, дослідники виділили рівні підготовки для різних методів залежно від необхідності відпрацювання певних практичних навичок:

Role-Play: при відпрацюванні складних комунікативних сценаріїв може бути модифіковане для різних курсів (повідомлення поганих новин, простий збір анамнезу, робота з тривожними батьками) , відпрацювання алгоритмів дій при нестандартних умовах

Standardized Patient: краще використовувати на підсумкових іспитах (OSCE) та інших іспитах, де необхідна стандартизація відповідей та поведінки пацієнта.

High-Fidelity Simulation: можна використати і при проведенні практики і при відпрацюванні медичних маніпуляцій, реанімаційних заходів (ALS, PALS) та гострих критичних станів, що вимагають технічної точності та моніторингу вітальних функцій у реальному часі

Рольова гра як симуляційна технологія. Role-play у медичній освіті є формою симуляційного навчання, у якій учасники відтворюють ролі лікаря, пацієнта, родича або іншого члена команди, що приймає участь в лікувально –діагностичному процесі. На відміну від манекенної симуляції, рольова гра дає змогу відтворити спектр людських емоцій, невербальну комунікацію, конфліктні ситуації та делікатний соціальний контекст. Під час її проведення дозволяє моделювати мову, емоції, невербальну поведінку, конфлікт.

Систематичний огляд A. Gelis та співавт., що включив 22 дослідження про ефективність peer role-play показав , що більшість студентів позитивно сприймали метод; у дослідженнях, де оцінювали навчання, він покращував комунікативні навички, хоча не перевищував за всіма показниками інші методи симуляційного навчання. Показав, що симуляція за участю рівних за статусом здобувачів рольова гра є ресурсозберігаючим та ефективним інструментом розвитку комунікативних компетенцій *(Gelis A.,2020)*

Рольова гра є ефективною не тому, що вона автоматично краща за можливі альтернативи, а тому, що вона дає змогу багаторазово тренувати певні професійні навички з відносно невеликими ресурсами. Окрім того, за результатами систематичного огляду виявилось, що залучення студентів до виконання ролей пацієнтів суттєво знижує бар'єр доступу до симуляційного навчання *(Cant R.P., 2010).* Проте для підсумкового оцінювання стандартизовані пацієнти мають перевагу за рахунок вищого рівня стандартизації поведінки *(Cleland J.A., 2009).* Відповідно, кращою для освітнього процесу є гібридна модель: використання peer role-play у поточному навчанні та відпрацюванні навичок, а стандартизованих пацієнтів — під час підсумкових атестацій (ОСКІ).

Формулювання задач та результатів кейс - методу з рольовою грою є першою сходинкою в реалізації цього методу.

Задачі та ***результати навчання*** кейс-рольової гри охоплюють такі рівні компетентності:

*Когнітивний***:** інтеграцію знань, диференційну діагностику, інтерпретацію результатів і клінічне судження.

*Практично-операційний***:** збір анамнезу, фізикальне обстеження, первинну оцінку, невідкладні дії та моніторинг.

*Комунікативний***:** активне слухання, прояв емпатії, пояснення, перевірку розуміння та спільне прийняття рішень,структурована передача інформації, деескалація конфліктів. Включає командну комунікацію по типу (замкненого кола) : делегування, уточнення доручень, ескалацію допомоги та взаємний контроль.

*Професійно-етичний***:** дотримання деонтологічних норм, прийняття відповідальності, усвідомлення меж власної компетентності. відповідальність, конфіденційність, етичне мислення та професійну ідентичність

Результати навчання повинні оцінюватись у вигляді спостережуваної поведінки. Формулювання на кшталт «студент розуміє алгоритм дій» є невалидним для оцінювання. Наприклад, замість «студент розуміє принципи невідкладної допомоги» краще: «студент упродовж перших хвилин визначає пріоритети

первинної оцінки, називає небезпечні ознаки, ініціює необхідні дії та повідомляє команду про потребу в ескалації». Саме таку поведінку можна оцінити.

Наступний пункт -це конструювання та алгоритмізація клінічного кейсу. Розробка навчального сценарію відбувається за принципом зворотного проектування, від визначення очікуваних результатів до створення клінічного контексту. Тобто не з історії хвороби, а з результатів навчання (*Nestel D., 2007).*

Викладач визначає, які саме поведінкові та фахові навички здобувач освіти повинен набути після заняття. Далі створюється ситуація, яка змушує проявити цю поведінку.

Кейс повинен мати достатню складність. Дуже простий сценарій можливий, але виключно для відпрацювання та відтворення одного або двох алгоритмів. Занадто складний - створює розумове перевантаження здобувача. Оптимальний рівень — ситуація, у якій студент має достатньо інформації для безпечного старту, але не має готового діагнозу.

Доцільно використовувати прогресивне розкриття. На першому етапі студент отримує скарги та короткий анамнез. Після поставлених запитань відкриваються додаткові дані. Після фізикального огляду видаються життєві показники. Після призначення плану обстежень можуть бути надані результати лабораторного чи інструментального дослідження. Такий формат моделює реальну роботу лікаря.

Рольові картки повинні бути зрозумілими. Роль пацієнта або родича має містити інформацію, з якої здобувач знає емоційний стан персонажу, мотивацію та правила реагування. Роль лікаря містить завдання але не готову відповідь. Також можуть бути додані інші ролі: представник страхової компанії, завідувач відділенням, що готовий прийти на допомогу для проведення консиліуму. Для спостерігачів потрібен чек-лист, який фіксує конкретні дії. І найголовніше викладач - фасилітатор, що надає необхідну додаткову інформацію в процесі проведення рольової гри. Складність кейсу має відповідати рівню підготовки групи

Етапи побудови клінічного кейсу для рольової гри:

1.Визначення навчальних цілей

2.Проектування клінічної ситуації та ступеня невизначеності

3. Розробка роздаточних матеріалів: Рольові картки + Чек-листи

4. Моделювання сценарію з покроковим розкриттям даних

Структура навчального заняття у вигляді кейс - методу з рольовою грою має бути чітко визначена у часі, бо достатньо важливо дотримуватись часових меж.

Тривалість стандартного заняття становить 60–90 хвилин і складається з п'яти послідовних фаз див (табл 2)

Таблиця 2.

Структура навчального заняття у вигляді кейс - методу з рольовою грою

Фаза	**Зміст та методичні завдання**	**ас**
1. Брифінг	Викладач формулює цілі, формат, правила конфіденційності, право на помилку та принцип «критика поведінки, а не особистості». Важливо: не розкривати рішення кейсу.	0–15 хв
2.Симуляційна дія	Рольова взаємодія. Викладач спостерігає, але не переривает студента без необхідності. Якщо сценарій передбачає зміну стану, викладач вводить нові дані у визначені моменти. Якщо студент пропускає критичну дію, слід дати можливість побачити наслідок, а не одразу виправити його.	5–20 хв
3. Дебрифінг	Його завдання — перетворити досвід на навчання. Сучасні систематичні огляди підтверджують важливість дебрифінгу	5–35 хв
4. Повторна спроба	Студент повторює критичний фрагмент із урахуванням зворотного зв’язку. Це дозволяє перейти від «я зрозумів помилку» до «я можу виконати правильну дію».	0–15 хв
5. Підсумки та	Індивідуалізація рекомендацій для подальшої самостійної роботи	–10

Фаза	Зміст та методичні завдання	ас
фідбек	здобувачів. оцінювання та план подальшого навчання.	хв

Джерело: створено автором з використанням джерела Nestel D 2007, Rudolph JW 2008

Методологія проведення дебрифінгу. Дебрифінг є центральною частиною рольової гри. Без нього студент може запам'ятати власне рішення, але не обов'язково зрозуміє, чому воно було ефективним або неефективним.

В педагогічній практиці рекомендується застосовувати структуровану 5-етапну модель, що має таку послідовність «реакція — опис — аналіз — узагальнення — перенесення» *(Rudolph J.W. at all, 2008)*

На етапі реакції учасники називають свої відчуття.

На етапі опису відновлюється перебіг події. Аналіз стосується клінічних рішень, комунікації та командної роботи.

Узагальнення дозволяє сформулювати правило, яке можна використати в інших схожих випадках.

Завершується дебрифінг конкретним планом дії або змінами дій в тій чи іншій ситуації.

Запитання фасилітатора повинні бути відкритими: «Що ви помітили?», «Що визначило ваш пріоритет?», «Яку альтернативу ви розглядали?», «Що могло змінити рішення?», «Як ця репліка могла бути сприйнята пацієнтом?». Небажано використовувати запитання, що приписують здобувачу освіти незнання або некомпетентність. Фасилітатор має уникати директивних оцінок, віддаючи перевагу відкритим запитанням, що стимулюють самостійну рефлексію студентів. Для якісного використання цього методу навчання важливо викладачеві розвивати власну фасилітаційну компетентність, а не

механічно застосовувати інформацію, що він подає здобувачеві протягом заняття.

Розгорнутий приклад проведення заняття за кейс - методом рольової гри:

Назва: «Гострий біль в животі у дитини, що триває до 7 днів»

Цільова аудиторія: студенти 6 курсу медичного факультету

Дисципліна: педіатрія

Тема: Гострий біль в животі у дитини, що триває менше 7 днів

Формат: симуляційне навчання кейс – метод з рольовою грою

Кількість учасників: 8–12 студентів

Тривалість: 90–110 хвилин

Основний клінічний діагноз кейсу: гострий пієлонефрит у дівчинки 3 років, що маніфестує переважно болем у животі.

Ролі: мати пацієнта, лікар, представник страхової компанії, завідувач відділенням де працює лікар, спостерігачі, викладач -фасилітатор.

Матеріали для підготовки до заняття: алгоритм діагностичного пошуку у дитини з тривалістю больового синдрому до 7 днів

1. Навчальні результати.

Після завершення рольової гри студент повинен уміти:

1.1. Провести послідовне клінічне обстеження.

Здобувач освіти:

- правильно розпочинає контакт із дитиною та матір'ю;
- уточнює основну скаргу;
- визначає час початку та тривалість болю;
- характеризує біль;
- з'ясовує динаміку симптомів;
- активно шукає симптоми, що можуть свідчити про хірургічну патологію;

- запитує про блювання, діарею, лихоманку, порушення сечовипускання, затримку випорожнень і газів, кров у випорожненнях, висип, кашель, задишку;
- проводить повний об'єктивний огляд;
- оцінює загальний стан;
- досліджує серцево-судинну та дихальну системи;
- проводить огляд і пальпацію живота;
- оцінює сечостатеву систему.

Це відповідає структурі алгоритму, наданого для підготовки до заняття.

1.2. Сформулювати попередній діагноз.

Студент має:

- сформувати диференційно-діагностичний ряд;
- визначити найбільш імовірний діагноз;
- аргументувати його конкретними клінічними ознаками;
- не встановлювати діагноз лише за одним симптомом — «біль у животі».

1.3. Призначити цільовий план обстеження.

Такий принцип відповідає наданому здобувачам алгоритму для підготовки до заняття, де після формування попереднього діагнозу передбачено цілеспрямований план обстеження.

Здобувач освіти повинен продемонструвати принцип доцільності призначення додаткових обстежень :

Всі обстеження, що призначаються повинні або підтвердити або спростувати діагноз, що підозрюється

Наприклад: якщо підозрюється дольова плевропневмонія у дитини, як причина болю в животі, то потрібне призначення лабораторних показників, що підтверджують запальний процес та рентгенографію органів грудної клітини

2. Зміст клінічного кейсу.

Загальна інформація для здобувачів. До приймального відділення дитячої лікарні звернулася мати з дівчинкою віком 3 роки.

Основна скарга матері: **дитина вже другу добу скаржиться на біль у животі, стала млявою і погано їсть.**

Завдання для лікаря — провести первинну оцінку дитини, визначити найбільш імовірну причину болю, сформулювати попередній діагноз, призначити необхідні дослідження, інтерпретувати їх результати, встановити клінічний діагноз та запропонувати лікувальну тактику.

Важливо: здобувачам на початку не повідомляється, що дитина має пієлонефрит, та результати огляду і обстежень видаються лише за запитом того хто грає роль лікаря приймального відділення.

2.1. Рівень складності.

Оскільки це студенти 6 курсу, сценарій передбачає:

- відсутність очевидної діагностичної підказки;
- кілька можливих причин абдомінального болю;
- необхідність виключення гострої хірургічної патології;
- можливість помилкового фокусування на апендициті;
- необхідність активного пошуку патології сечової системи;
- лабораторні результати, які потрібно інтерпритувати в контексті клініки;
- роль адміністративного учасника, який змушує студента аргументувати доцільність кожного призначення;
- консиліум при необхідності розширення діагностичного пошуку.

3. Прогресивне розкриття інформації.

Це принципово важлива частина гри.

Здобувач не отримує всю інформацію одразу.

Викладач видає дані лише після того, як студент правильно запитав або виконав відповідну дію.

Етапи подачі інформації .

ЕТАП 1. Первинне звернення.

Студент отримує тільки:

Дівчинка 3 років. Скарги на біль у животі протягом 2 діб.

Мати говорить:

«Дитина стала якась не така. Їй болить животик, вона плаче і майже нічого не їсть».

ЕТАП 2. Коли студент збирає анамнез то отримує лише ту інформацію, що запитує.

Мати повідомляє:

- біль виник близько 36 годин тому;
- спочатку був помірним;
- поступово посилився;
- дитина стала менш активною;
- температура підвищувалася до 39,2 °С;
- температура знижується після жарознижувального, але через декілька годин знову підвищується;
- апетит значно знижений;
- за останню добу дитина пила менше;
- блювання двічі не пов’язане з їжею ;
- діареї немає.

Подальша комунікація з матір’ю (вся секретна інформація для акторки/студента, який грає матір, в рольовій картці)

Основні дані:

Дитина: дівчинка, 3 роки.

Характер матері: тривожна, але адекватна; боїться, що у дитини «апендицит».

Якщо лікар запитує про біль:

Відповідь:

«Каже, що болить животик. Спочатку показувала на весь животик, зараз більше показує сюди…»

Мати показує на нижню частину живота, але не наполягає на правій клубовій ділянці.

Якщо лікар уточнює:

- біль постійний — так, але інтенсивність змінюється;
- приступоподібний — ні;
- дитина не прокидається від болю вночі;
- рухи не роблять біль різко сильнішим.

Якщо лікар запитує про температуру:

«Вчора ввечері було 39,2. Сьогодні зранку 38,7».

Якщо лікар запитує про сечовипускання:

Це ключова підказка, але мати не повинна повідомити її без запитання.

Якщо лікар запитує:

«А як вона ходить по-маленькому?»

Мати відповідає:

«Мені здається, частіше. І два рази казала, що їй щипає, коли пісяє».

Якщо студент не запитує — мати сама не повідомляє.

Якщо запитують про запах сечі:

«Так, останні два дні мені здається, що сеча стала якось різкіше пахнути».

Якщо запитують про біль у попереку:

«Не болить ».

Якщо запитують про блювання:

«так , два рази, вчора раз і сьогодні але не пов’язане з прийомом їжі ».

Якщо запитують про випорожнення:

«Учора був кашоподібний 2 рази на день».

Якщо запитують про діарею:

«Ні».

Якщо запитують про висип:

«Ніякого висипу немає».

Якщо запитують про кашель/задишку:

«Ні, кашлю немає. Дихає нормально».

Якщо студент говорить про апендицит:

Мати запитує:

«А це може бути апендицит? Я саме цього найбільше боюся».

Якщо студент пояснює план:

Мати співпрацює.

Якщо лікар говорить медичними термінами:

«Я не дуже розумію. Ви можете пояснити простіше?»

Це дозволяє оцінити комунікативну компетентність.

Етап об'єктивного обстеження :

Студент повинен сам запросити результати або виконати відповідний етап огляду (результати огляду повідомляє викладач , відповідно до запиту здобувача)

Загальний стан:

- стан середньої тяжкості;
- дитина млява;
- контактна;
- реагує на огляд;
- шкіра блідувата;
- висипу немає.

Температура -39,0 °С,ЧСС -128/хв ЧД -28/хв SpO_2 -98% АТ -100/60 мм рт. ст.

Дихальна система:

- дихання везикулярне;
- хрипів немає;
- ознак дихальної недостатності немає.

Серцево-судинна система:

- тони серця ритмічні;
- тахікардія відповідає температурі;
- патологічних шумів немає;
- капілярне наповнення <2 с.

Пальпація живота:

Це один із ключових етапів.

При поверхневій пальпації:

- живіт м'який;
- помірна болючість у нижніх відділах;
- захисного напруження немає.

При глибокій пальпації:

- помірна болючість у надлобковій ділянці;
- справа в клубовій ділянці — без вираженої локальної болючості.

Симптоми подразнення очеревини:

- Щоткіна–Блюмберга — негативний;
- «дошкоподібного» живота немає;
- симптоми перитонеального подразнення відсутні.

Це важливо, оскільки у вихідному алгоритмі саме оцінка ознак гострого живота є одним із ключових етапів.

Обстеження сечостатевої системи:

Якщо студент правильно включає цей етап:

- зовнішні статеві органи є помірна гіперемія вульви, виділень не має ;
- набряку немає;
- є виділення жовтуватого кольору із піхви;
- симптом Пастернацького - негативний (у дітей до 6 років може бути негативним при пієлонефриті) .

ЕТАП 3. Основні точки прийняття рішення.

Перша точка: формулювання попереднього діагнозу

«Які ваші попередні діагнози?»

Очікується щонайменше:

1. **Гострий пієлонефрит / верхня ІСШ.**
2. Гострий апендицит — необхідно виключити.
3. Гострий гастроентерит — менш імовірний.
4. Пневмонія з абдомінальним синдромом — менш імовірна.
5. Інша патологія сечової системи.

Сильна відповідь:

«Найбільш імовірним є гострий пієлонефрит, оскільки є лихоманка, абдомінальний біль, дизурія, частіше сечовипускання і відсутність діареї та ознак подразнення очеревини. Водночас через гострий біль у животі апендицит повинен бути виключений».

Друга точка: призначення плану обстежень

Очікуваний план обстеження :

Обов'язково:

- ЗАК (загальний аналіз крові) ;
- CRP (С -реактивний білок) ;
- ЗАС (загально клінічний аналіз сечі) ;
- посів сечі з антибіотикограмою;
- біохімічний аналіз крові за показаннями; з вказанням конкретних показників оцінки функції нирок (креатинін, сечовина, швидкість клубочкової фільтрації)
- УЗД нирок/сечових шляхів за клінічною ситуацією.

При підозрі на гострий пієлонефрит культура сечі має бути отримана до антибіотикотерапії, якщо це можливо без небезпечної затримки лікування.

В будь якому випадку призначені обстеження мають відповідати діагнозам, що підозрюються з метою їх підтвердження або виключення.

Третя точка: узгодження плану обстежень з представником страхової компанії

Активація ролі представника страхової компанії:

Це не просто «адміністративна роль».

Її педагогічна мета — змусити здобувача аргументувати кожне обстеження.

Представник страхової компанії (ця інформація в рольовій картці) ви присутній, як умовний експерт із медичної обґрунтованості призначень.

Основне правило:

«Ви погоджуєте обстеження лише тоді, коли студент може пояснити, який діагностичний пошук воно забезпечує».

Запитання страхового представника:

Якщо студент призначає:

ЗАК«Яке діагностичне питання ви вирішуєте за допомогою цього аналізу?»

CRP«Чим результат CRP змінить вашу тактику?»

ЗАС«Чому аналіз сечі необхідний саме цій дитині з болем у животі?»

Посів сечі«Чому недостатньо загального аналізу сечі?»

УЗД черевної порожнини «Яку саме патологію ви хочете підтвердити або виключити?»

КТ «Яке конкретне клінічне питання не може бути вирішене за допомогою доступних методів?»

На всі обстеження, що не відповідають попереднім діагнозам - запитують про доцільність.

Це дуже важливий педагогічний момент: здобувач повинен перестати мислити за принципом **«**призначу все**»**.

Роль представника страхової компанії також може бути оцінена за тими компетентностями, що перевіряються на цьому етапі у здобувача, що має роль лікаря.

Активація ролі завідувача відділення:

Завідувач **не з'являється на початку** та також не знає остаточний діагноз кейсу

Він входить у сценарій лише тоді, коли:

- здобувач в ролі лікаря хоче призначити широкий перелік досліджень;
- виникає невизначеність;
- студент пропонує КТ;
- студент не може пояснити, чому потрібне додаткове дослідження;
- або студент сам ініціює консиліум.

Репліка завідувача, що прописано в рольовій картці:

«Колеги, перед тим як ми будемо розширювати обстеження, сформулюйте, будь ласка:

1. Який ваш попередній діагноз?
2. Які аргументи його підтверджують?
3. Яку патологію ви зараз повинні виключити?
4. Який результат дослідження змінить вашу лікувальну тактику?»

Якщо студент просить КТ (або інше обстеження):

Завідувач:

«Що саме ви хочете побачити на КТ? Чому отриманих клінічних та лабораторних даних недостатньо? Яка потенційна користь переважає ризики цього дослідження?»

Як результат – пропонує своє бачення ситуації або погоджується з лікарем

ЕТАП 4 Інтерпретація результатів обстеження.

Після того як студент призначив дослідження, викладач видає результати.

ЗАК: Hb — 108 г/л, лейкоцити — 17,4 × 10^9/л, нейтрофіли — 78%, тромбоцити — 356 × 10^9/л, CRP 112 мг/л

ЗАС: колір — жовтий; каламутна; лейкоцити — >50 у полі зору; еритроцити — 3–5 у полі зору; бактерії — +++; білок — +; нітрити — позитивні. Будь які інші результати обстежень -повинні бути в нормі

Завдання для здобувача, в ролі лікаря:

«Інтерпретуйте результати лабораторних обстежень» .

Очікувана відповідь:

«Є ознаки запалення із нейтрофільним лейкоцитозом та високим CRP. В налізі сечі значна лейкоцитурія, бактеріурія та позитивні нітрити , що може бути ознакою гострого пієлонефриту».

УЗД

Якщо студент призначив УЗД:

УЗД нирок і сечового міхура: нирки розташовані правильно, розміри відповідають віку. Паренхіма без грубих структурних змін. Можливе незначне посилення ехогенності/ознак запальних змін, без абсцесу. Чашково-мискова система не розширена. Ознак обструкції немає. Сечовий міхур без значущих патологічних змін.

ЕТАП 5 Фінальне формулювання клінічного діагнозу.

Очікувана відповідь:

Гострий пієлонефрит, неускладнений перебіг, середньотяжкий стан, без ознак обструкції сечових шляхів.

Здобувач повинен обгрунтувати цей діагноз

А також оцінити наскільки типовим був перебіг захворювання для дитини 3 років

Результат посіву сечі:

Цей результат видається **лише на наступному етапі**, після формулювання клінічного діагнозу.

Посів сечі: Escherichia coli $>10^5$ КУО/мл.

Антибіотикограма:

- чутливість до призначеного препарату;

резистентність до частини альтернативних препаратів

ЕТАП 6 Лікувальна тактика.

Для даного кейсу не є ключовим питанням, не оцінюється, але може бути обговорена.

Студент повинен назвати:

1. Антибактеріальна терапія

Антибіотикотерапія після отримання матеріалу для посіву сечі, з подальшою корекцією відповідно до антибіотикограми.

Для симуляційного сценарію можна передбачити:

цефтріаксон 50–75 мг/кг/добу IV 1 раз на добу у разі необхідності парентеральної терапії, з переходом на пероральний препарат після клінічного покращення та відповідно до чутливості збудника.

2. Регідратація

забезпечити адекватне споживання рідини; при неможливості пероральної регідратації — внутрішньовенна терапія за показаннями.

3. Антипіретична терапія.

За наявності лихоманки/дискомфорту: парацетамол або ібупрофен — відповідно до віку, маси тіла та протипоказань.

4. Моніторинг температура; загальний стан; діурез; переносимість лікування; клінічна відповідь на антибіотикотерапію.

5. Контроль результатів посіву

Після отримання антибіотикограми: деескалація/зміна антибіотика відповідно до чутливості, якщо це необхідно.

Педагогічна пастка кейсу:

Студенту спеціально створюється ситуація, в якій дуже легко сказати:

«Біль у животі та температура це апендицит». Або « блювання та кашоподібні випорожнення та температура це гостра кишкова інфекція.

Але завдання полягає в тому, щоб він не закривав діагностичний пошук передчасно**.**

Правильний алгоритм (наданий для вивчення до заняття), дотримання якого теж буде відслідковуватись, це :

Гострий біль у животі → оцінка небезпечних ознак → повний анамнез → повний огляд → диференційна діагностика → попередній діагноз → цільові дослідження → інтерпретація → клінічний діагноз → лікування.

Оцінювання:

Чек-лист спостерігача:

Спостерігачі не просто дивиться на колегу. Їх завдання — фіксувати клінічне мислення та оцінювати дії здобувача, що виконує роль лікаря за градуйованою шкалою

Оцінювання кожного пункту дій за алгоритмом.

0 — Дія відсутня / критично помилкова

1 — Виконано частково / з істотними відхиленнями від протоколу

2 — Виконано адекватно та безпечно

3 — Виконано високопрофесійно, впевнено та адаптивно

Перелік дій за алгоритмом, що підлягає відпрацюванню та оцінюванню:

1. Представився, встановив контакт
2. Уточнив вік дитини
3. Уточнив тривалість болю
4. Спитав про можливу травму
5. Спитав про насильство
6. З'ясував динаміку болю
7. Перевірив симптоми подразнення очеревини
8. Запитав про блювання

9. Запитав про лихоманку

10. Запитав про діарею
11. Запитав про випорожнення/гази
12. Запитав про сечовипускання
13. Запитав про дизурію
14. Запитав про висип
15. Оцінив дихання
16. Оцінив гемодинаміку
17. Провів огляд животата пальпацію глибоку живота
18. Обстежив сечостатеву систему
19. Сформулював диференційний діагноз
20. Виділив пієлонефрит як один із основних діагнозів
21. Аргументував попередній діагноз
22. Призначив ЗАК
23. Призначив CRP
24. Призначив ЗАС
25. Призначив посів сечі
26. Обґрунтував УЗД
27. Інтерпретував ЗАК
28. Інтерпретував CRP
29. Інтерпретував ЗАС
30. Інтерпретував посів
31. Сформулював клінічний діагноз

Додаткове завдання спостерігачам:

Щоб усі студенти були активними, кожному спостерігачу призначається **окрема місія**.

Спостерігач №1 — «Алгоритм»:

Відстежує:

Чи дотримувався студент послідовності обстеження?

Спостерігач №2 — «Клінічне мислення»:

Записує:

1. Які діагнози назвав студент?
2. Який поставив на перше місце?
3. Якими аргументами це обґрунтував?
4. Чи виникло передчасне закриття діагностичного пошуку?

Спостерігач №3 — «Раціональна діагностика»:

Фіксує кожне призначене дослідження:

Яке питання воно повинно було вирішити?

Наприклад:

ЗАС - чи є ознаки інфекції сечових шляхів

Спостерігач №4 — «Безпека пацієнта»:

Відстежує:

- чи виключив гострий живіт;
- чи не пропустив септичний стан;
- чи врахував діурез;
- чи правильно визначив пріоритетність лікування;
- чи не затримував антибіотикотерапію без достатніх причин.

Спостерігач №5 — «Комунікація»:

Оцінює:

- контакт із матір'ю;
- зрозумілість пояснень;
- емпатію;
- використання медичної термінології;

- перевірку розуміння.

Дебрифінг:

Питання для різних фаз мають бути підготовлені завчасно):

Фаза реакції:

1. Як ви почувалися на початку сценарію?
2. У який момент ви зрозуміли, що ситуація може бути складнішою, ніж просто біль у животі?
3. Який момент був для вас найскладнішим?

Фаза опису:

Про алгоритм:

1. Якою була ваша послідовність обстеження?
2. Чи вдалося вам дотриматися алгоритму?
3. Який етап ви пропустили або виконали недостатньо повно?
4. Які дані ви отримали чи не отримали від матері?

Аналіз клінічного мислення:

Ключові питання:

1. Яким був ваш перший диференційний ряд?
2. Чому ви поставили апендицит/пієлонефрит або кишкову інфекцію на перше місце?
3. Які дані говорили проти апендициту?
4. Яка інформація була ключовою для підозри на пієлонефрит?
5. У який момент ви змінили свою діагностичну гіпотезу?
6. Чи було у вас передчасне «закриття» діагнозу?

Аналіз діагностичних призначень:

1. Чому ви призначили ЗАК?
2. Чому CRP?
3. Чому ЗАС?
4. Чому потрібен посів сечі?
5. Чому недостатньо лише ЗАС?

6. Чому ви призначили УЗД?

7. Чи була необхідність у КТ?

8. Яке дослідження ви могли призначити зайво?

9. Чи були у вас дослідження, які не змінювали б тактику?

Аналіз інтерпретацій:

«Який лабораторний результат найбільше змінив ваше рішення?»

«Чи могли б ви поставити діагноз пієлонефриту лише за позитивним ЗАС?»

«Яке значення має поєднання лихоманки, дизурії, лейкоцитурії та високого CRP?»

«Яку інформацію дає посів сечі, якої не дає ЗАС?»

«Чому антибіотикограма важлива для подальшої терапії?»

Обговорення лікування:

1. Коли ви повинні розпочати антибіотикотерапію?

2. Чи потрібно чекати результату посіву?

Аналіз комунікації:

1. Чи зрозуміла мати, що відбувається з дитиною?

2. Чи пояснили ви, навіщо потрібен аналіз сечі?

3. Як ви пояснили необхідність антибіотика?

4. Чи сказали ви матері, що апендицит наразі малоймовірний, але його необхідно було виключити?

5. Чи перевірили ви розуміння матері?

«Питання-пастки» для дебрифінгу.

Це питання високого рівня, які особливо добре працюють зі студентами 6 курсу.

Якби мати не сказала вам про дизурію, чи змогли б ви запідозрити пієлонефрит?

Що сталося б, якби ви вирішили, що це апендицит, і припинили подальший збір анамнезу?

Чи може дитина з пієлонефритом звернутися лише з болем у животі?

Яка інформація є «червоним прапорцем» для хірургічної патології?

Чи означає відсутність симптомів подразнення очеревини, що хірургічна патологія неможлива?

ПОВТОРНА СПРОБА.

Після дебрифінгу студенти міняються ролями.

Наприклад:

- лікар → стає спостерігачем;
- спостерігач → лікарем;
- мати → представником страхової компанії;
- страховий представник → матір'ю;
- новий студент отримує роль завідувача.

Другий раунд.

Викладач скорочує сценарій.

Новий студент отримує:

«Дівчинка 3 років, гострий біль у животі, температура 39 °C».

І має за 5–7 хвилин:

1. провести цільовий анамнез;
2. виконати послідовний огляд;
3. назвати 3 основних диференційних діагнози;
4. визначити найбільш імовірний;
5. призначити ключові дослідження;
6. пояснити матері план.

Це дозволяє перевірити, чи відбулося навчання після дебрифінгу, а не лише емоційне обговорення.

Фінальне завдання для кожного студента:

Наприкінці заняття кожен студент письмово завершує три речення:

1. Сьогодні я навчився/навчилася…

2. Моєю основною помилкою було…

3. Наступного разу при дитині з гострим болем у животі я обов'язково…

Це перетворює рольову гру на формувальне навчання з індивідуальним планом удосконалення.

Залежно від тривалості занять можна змінювати складність кейсу та їх кількість . А також оцінювати як одну , дві або більше практичних навичок , що відпрацьовує студент під час заняття (тільки відпрацювання алгоритму, або ще комунікації, вміння призначати обстеження, вміння інтерпретувати дослідження, комунікація з колегами)

Система оцінювання:

Якщо заняття спрямоване на клінічне мислення, не можна оцінювати тільки комунікацію. Якщо метою є комунікація, неправильна діагностична гіпотеза не повинна автоматично нівелювати всі сильні сторони проведеної взаємодії

Оцінювання повинно відповідати цілям і мати формувальний підхід : оптимально використовувати аналітичні рубрики із 4-рівневою шкалою градації дій , з яких формується оцінка *(Nestel D.at all, 2007)*

Градація дій:

0 — Дія відсутня / критично помилкова

1 — Виконано частково / з істотними відхиленнями від протоколу

2 — Виконано адекватно та безпечно

3 — Виконано високопрофесійно, впевнено та адаптивно

За даними чек -листа, конкретними діями можна оцінити : клінічне мислення, безпеку пацієнта, ефективність збору інформації, комунікацію, командну роботу, ступінь засвоєння навички залежно від сформованих навчальних цілей *(Rudolph J.W.at all, 2008)*

Зворотний зв'язок має бути предметним і конструктивним, орієнтованим на конкретні зміни в дії, а не на абстрактне схвалення чи критику. Наприклад по завершенню консультації сформулюйте план простими реченнями та перевірте, що мати його зрозуміла , замість «потрібно якісніше спілкуватись»

Сучасний AMEE Guide з формувального оцінювання наголошує на вирівнюванні оцінки з навчальними цілями, своєчасності зворотного зв'язку та використанні само- й взаємооцінювання *(Anastasiya A.,2026).*

Психологічна безпека та етичний контекст:

Емоційний стрес часто супроводжує учасників рольової гри, через страх професійної несопроможності або публічної помилки. Першочерговим завданням викладача є створення середовища психологічної безпеки є

Ключові принципи забезпечення психологічної безпеки *(Rudolph J.W.at all, 2008).*

*Базовий контракт***:** обговорення правил до початку гри. Визнання того, що помилки на симуляційному майданчику є природним інструментом навчання.

*Деперсоналізація критики***:** обговорення стосується виключно ролі та дій у сценарії, а не особистості студента.

Правило «Стоп-гра»: студент має право призупинити участь у сценарії за умов виникнення надмірного психоемоційного напруження (наприклад, через особистий негативний досвід у минулому).

Конфіденційність: перебіг симуляції та помилки учасників не підлягають обговоренню поза межами навчальної кімнати.

Роль викладача-фасилітатора:

Імплементація даного методу вимагає трансформації традиційної авторитарно-дидактичної ролі викладача у позицію фасилітатора та модератора освітнього процесу.

Викладач-фасилітатор:

1. Не нав'язує власну думку під час виконання кейсу, надаючи студентам можливість побачити природні наслідки своїх рішень.
2. Контролює дотримання хронометражу та сценарію.
3. Володіє техніками мікрофасилітації дебрифінгу (постановка системних запитань, управління груповою динамікою, деескалація суперечок).

4. Забезпечує коректний та об'єктивний аналіз результатів.

Порівняльний аналіз переваг та обмежень методу:

Впровадження кейс-методу у форматі рольової гри вимагає розуміння його сильних сторін та потенційних ризиків

Переваги та обмеження методу:

Переваги. Економічність, високий рівень залученості здобувачів освіти, сполучення теоретичних знань із практичною діяльністю, розвиток емпатичних і комунікативних компетенцій, а також можливість багаторазово та безпечно відпрацьовувати помилки у складі команди належать до ключових сильних сторін методу.

Особливу цінність рольова гра має у сценаріях, де фундаментальне значення має поведінковий аспект: консультування, донесення інформації, вирішення конфліктів, надання допомоги в умовах невизначеності та взаємодія з тривожними родичами чи колегами. Окрім того, цей підхід дає змогу здобувачу наочно усвідомити рефлекторний вплив власних висловлювань на співрозмовника.

Суттєвою перевагою є можливість зміни освітньої перспективи. Студент, виступаючи в ролі пацієнта, отримує змогу глибше зрозуміти складність сприйняття медичної термінології, відчути суб'єктивне переживання невизначеності та сформувати реалістичні очікування від дій лікаря.

Для навчальних закладів з обмеженим матеріально-технічним забезпеченням важливою є відсутність потреби у постійному залученні професійних акторів при застосуванні рольової гри. Втім, подібна ресурсозберігаюча перевага не повинна ставати підставою для відмови від залучення стандартизованих пацієнтів у ситуаціях, що вимагають високої надійності підсумкового оцінювання.

Недоліки та обмеження. Головним методичним обмеженням виступає варіабельність рольового виконання, оскільки однаковий сценарій може бути відтворений різними студентами по-різному, що знижує рівень стандартизації.

Другий критичний фактор — висока залежність від майстерності фасилітатора, адже некоректний дебрифінг здатен нівелювати цінність навіть детально продуманого сценарію. Додатковий ризик становить ймовірність виникнення психологічного дискомфорту, коли емоційно насичені сюжетні лінії активують особисті переживання учасників. Останнє вимагає впровадження чітких правил психологічної безпеки, забезпечення права на достроковий вихід із ролі та явного розмежування особистості студента та його персонажа.

Суттєву проблему становить також нерівномірність студентської залученості, за якої більш активні учасники домінують у процесі, тоді як менш ініціативні залишаються в ролі пасивних спостерігачів. Для усунення цього недоліку застосовують регулярну ротацію ролей, формулювання структурованих завдань для спостерігачів і введення коротких індивідуальних рефлексій.

Окремим обмеженням є часовий ресурс: якісне проведення рольової гри із наступним дебрифінгом потребує значно більше часу, ніж тестовий контроль. Однак пряме порівняння цих інструментів лише за часовим критерієм є методологічно некоректним через відмінність їхніх дидактичних цілей.

Інтеграція у навчальну програму. Кейс-рольова гра може бути складовою спіральної програми *(Harden R.M.,at all, 1999).* На молодших курсах можна відпрацьовувати прості комунікативні ситуації та збір базового анамнезу. На старших — тренувати клінічне мислення, відпрацьовувати надання допомоги при невідкладних станах та командну роботу. На етапі інтернатури — сценарії з високою невизначеністю та міжпрофесійною взаємодією.

Доцільно комбінувати три режими. Навчальний режим допускає підказки та активний дебрифінг. Тренувальний режим передбачає мінімум допомоги. Оцінювальний режим використовує стандартизований сценарій і чіткі критерії.

Таким чином, рольова гра не повинна бути ізольованою «цікавою парою». Вона може входити до системи формування компетентностей і повторюватися з поступовим підвищенням складності.

Практичні рекомендації викладачу:

1. Починайте з навчальних результатів.
2. Вибирайте клінічно значущу ситуацію.
3. Дозуйте складність відповідно до рівня студентів.
4. Використовуйте прогресивне розкриття інформації.
5. Підготуйте короткі рольові картки.
6. Стандартизуйте ключові дані, але залишайте місце для природної комунікації.
7. Підготуйте чек-лист спостерігача.
8. Плануйте питання дебрифінгу заздалегідь.
9. Давайте конкретний зворотний зв’язок.
10. За можливості проводьте повторну спробу.
11. Ротуйте ролі та давайте завдання спостерігачам
12. Для сумативного оцінювання використовуйте еквівалентні сценарії.
13. Захищайте психологічну безпеку.
14. Порівнюйте результати не тільки за задоволеністю, а й за поведінковими показниками.

Кейс -рольової гри (шаблон для викладача):

Назва кейсу: _____

Дисципліна / курс: _____

Навчальні результати: _____

Цільова тривалість: _____

Ролі та картки для них_____

Початкова інформація: _____

Прихована інформація: _____

Критичні рішення: _____

Умови зміни сценарію: _____

Критерії безпеки: _____

Критерії оцінювання: _____

Питання для дебрифінгу: _____

План повторної спроби: _____

Індивідуальний план розвитку: _____

Висновки. Застосування кейс-методу у форматі рольової гри виступає обґрунтованою педагогічною технологією для активного та досвідного навчання здобувачів медичної освіти. Завдяки такому підходу вдається синтезувати у єдиному освітньому просторі комунікативні навички, клінічне мислення, командну взаємодію та професійну поведінку.

Дана методика має особливу цінність для розвитку практичних умінь, які важко сформувати за допомогою традиційного тестування чи лекційного викладання, а також для проведення формувального оцінювання та багаторазової практики. Водночас рольову гру не слід вважати універсально переважною порівняно з манекенною симуляцією, залученням стандартизованих пацієнтів чи іншими навчальними підходами — її доцільно розглядати як елемент єдиного педагогічного континууму.

Серед ключових умов високої ефективності методу слід виділити наявність чітко сформульованих навчальних результатів, використання автентичного кейсу відповідного рівня складності, розробку якісних рольових карток, створення середовища психологічної безпеки, а також проведення структурованого дебрифінгу та валідного формувального оцінювання. Своєю чергою, перспективний вектор наукових досліджень має бути спрямований на вивчення довготривалих освітніх результатів, перенесення набутих навичок у реальну клінічну практику та їхній вплив на пацієнт-орієнтовані наслідки.

References:

Cook D. A., Hatala R., Brydges R., Zendejas B., Szostek J. H., Wang A. T. et al. Technology-enhanced simulation for health professions education: a systematic review and meta-analysis. *JAMA*. 2011. Vol. 306, No. 9. P. 978–988. DOI: https://doi.org/10.1001/jama.2011.1234

Chernikova O., Heitzmann N., Stadler M., Holzberger D., Seidel T., Fischer F. Simulation-based learning in higher education: A meta-analysis. *Review of Educational Research*. 2020. Vol. 90, No. 4. P. 499–541. DOI: https://doi.org/10.3102/0034654320933544

Eppich W., Cheng A. Promoting Excellence and Reflective Learning in Simulation (PEARLS): development and rationale for a blended approach to health care simulation debriefing. *Simulation in Healthcare*. 2015. Vol. 10, No. 2. P. 106–115. DOI: https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000072

The effectiveness of case-based learning in health professional education. A BEME systematic review: BEME Guide No. 23 / J. E. Thistlethwaite et al. *Medical Teacher*. 2012. Vol. 34, No. 6. P. e421–e444. DOI: https://doi.org/10.3109/0142159X.2012.680939

Nestel D., Tierney T. Role-play for medical students learning communication skills. *BMC Medical Education*. 2007. Vol. 7. Art. 3. DOI: https://doi.org/10.1186/1472-6920-7-3

Cleland J. A., Abe K., Rethans J. J. The use of standardized patients in medical education: AMEE Guide No. 42. *Medical Teacher*. 2009. Vol. 31, No. 6. P. 477–486. DOI: https://doi.org/10.1080/01421590903002821

Cant R. P., Cooper S. J. Simulation-based learning in nurse education: systematic review. *Journal of Advanced Nursing*. 2010. Vol. 66, No. 1. P. 3–15. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2009.05240.x

Debriefing as formative assessment in healthcare simulation / J. W. Rudolph et al. *Academic Emergency Medicine*. 2008. Vol. 15, No. 11. P. 1010–1016. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2008.00248.x

Ten Cate O. Entrustable Professional Activities: Currents and Currency of Professional Competence. *Academic Medicine*. 2013. Vol. 88, No. 11. P. 1578–1583. DOI: https://doi.org/10.1097/ACM.0b013e3182a3e06f

Harden R. M. What is a spiral curriculum? *Medical Teacher*. 1999. Vol. 21, No. 2. P. 141–143. DOI: https://doi.org/10.1080/01421599979752

Application of case-based learning in medical student education: a meta-analysis / X.-Y. Cen et al. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*. 2021. Vol. 25, No. 8. P. 3173–3181. DOI: https://doi.org/10.26355/eurrev_202104_25726

Effectiveness of case-based learning in comparison to alternate learning methods on learning competencies and student satisfaction among healthcare professional students: A systematic review / B. Varma et al. *Journal of Education and Health Promotion*. 2025. Vol. 14. Art. 76. DOI: https://doi.org/10.4103/jehp.jehp_510_24

Case-based learning (CBL) in undergraduate health professions education: A realist review / R. Daly et al. *Medical Education*. 2026. Vol. 60, No. 8. P. 846–864. DOI: https://doi.org/10.1111/medu.70179

Students as patients: A systematic review of peer simulation in health care professional education / N. Dalwood et al. *Medical Education*. 2020. Vol. 54, No. 5. P. 387–399. DOI: https://doi.org/10.1111/medu.14058

Peer Role-Play for Training Communication Skills in Medical Students: A Systematic Review / A. Gelis et al. *Simulation in Healthcare*. 2020. Vol. 15, No. 2. P. 106–111. DOI: https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000412

Lipnevich A. A., Mattern K., Feddock C. Formative assessment and feedback in medical education: A practical guide: AMEE Guide No. 189. *Medical Teacher*. 2026. Vol. 48, Iss. 6. P. 921–940. DOI: https://doi.org/10.1080/0142159X.2025.2569623

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-560
UDC 004.8:378.4:378.147

CHAPTER 16.
MULTI-AGENT AI SYSTEMS ARCHITECTURE FOR UNIVERSITY EDUCATION TRANSFORMATION: FROM ADAPTIVE LEARNING TO ADMINISTRATIVE DECISIONS

Daria FEDORENKO
B.Sc. student in Computer Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Department of Cybersecurity and Intelligent Information Technologies,
(Vadym Manko St., 17, Kharkiv, 61070, Ukraine)
d.d.fedorenko@student.csn.khai.edu
https://orcid.org/0009-0008-9623-4501

Heorhii ZEMLIANKO
Ph.D. in cybersecurity, Associate Professor
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Department of Cybersecurity and Intelligent Information Technologies,
(Vadym Manko St., 17, Kharkiv, 61070, Ukraine)
g.zemlynko@csn.khai.edu
https://orcid.org/0000-0003-4153-7608

Abstract. The paper presents a comprehensive multi-agent artificial intelligence architecture for university education transformation. It addresses the fragmentation of existing institutional systems by proposing an integrated ecosystem of specialized AI agents. The architecture includes personalized learning, resource optimization, security monitoring, and administrative automation modules interconnected via a centralized AI core. The study builds upon previous research on intelligent assistant models, extending them to a full multi-agent paradigm. Key challenges such as data privacy, algorithmic transparency, and ethical governance are systematically addressed. The proposed system demonstrates potential for 15% higher anomaly detection accuracy and reduced incident response time to 2.3 seconds. Implementation roadmap includes functional prototype development, MVP creation for personalized learning, and large-scale validation with 500+ users. The research contributes to ethically governed, scalable AI systems that optimize educational processes while maintaining security and privacy standards. Future directions include integration with immersive technologies and learning analytics.

Keywords: multi-agent systems, artificial intelligence, higher education, adaptive learning, educational technology, privacy-preserving AI, university management

Introduction. The rapid advancement of artificial intelligence (AI) has catalyzed a profound transformation across all sectors of society, with higher education standing at the forefront of this paradigm shift. Universities worldwide are increasingly integrating AI-powered tools into their academic, administrative, and operational frameworks, aiming to enhance educational quality, optimize resource allocation, and improve institutional efficiency. However, despite these advancements, the majority of current implementations remain fragmented, relying on isolated single-agent systems that address narrowly defined tasks without meaningful integration across functional domains. This fragmentation creates significant barriers to achieving the holistic, intelligent university ecosystem that contemporary higher education demands.

The concept of multi-agent systems (MAS) has emerged as a promising architectural paradigm capable of overcoming these limitations. Unlike conventional single-agent AI applications, MAS comprises multiple specialized autonomous agents that collaborate, coordinate, and negotiate to achieve complex collective goals. Recent research has demonstrated the efficacy of multi-agent architectures in educational contexts, particularly for simulating diverse instructional roles such as AI teachers, AI teaching assistants, and AI classmates *(Hao et al., 2026).* These systems enable differentiated engagement patterns—including co-construction of knowledge and co-regulation—that can significantly reduce performance gaps among students with varying levels of prior knowledge *(Hao et al., 2026).* Furthermore, multi-agent frameworks have been successfully deployed to automate end-to-end course material generation, including syllabus creation, lecture scripts, and assessments, thereby reducing faculty workload while maintaining pedagogical alignment *(Yao et al., 2026).*

Despite these promising developments, the integration of multi-agent AI systems into university environments remains a nascent field characterized by numerous technical, ethical, and organizational challenges. The fragmentation of existing institutional information systems—comprising learning management systems

(LMS), enterprise resource planning (ERP) platforms, student information systems (SIS), and cybersecurity infrastructure—poses substantial obstacles to creating a unified intelligent environment. Existing AI educational solutions predominantly focus on discrete functional areas such as personalized learning, academic advising, or content generation, without addressing the comprehensive integration required for a truly intelligent university ecosystem.

The ethical dimension of AI deployment in education adds another layer of complexity. The use of AI in educational settings raises critical concerns regarding data privacy, algorithmic transparency, fairness, and the preservation of human agency in decision-making processes that significantly affect students' academic trajectories. *Holmes et al. (2021)* emphasize that the positive intent behind AI in education does not automatically guarantee ethical implementation; rather, additional considerations of fairness, accountability, transparency, and inclusiveness are required. The integration of AI agents into university environments must therefore be governed by robust ethical frameworks that ensure the protection of personal data, the explainability of algorithmic decisions, and the preservation of meaningful human oversight over consequential actions.

This chapter addresses these interconnected challenges by proposing a comprehensive multi-agent AI architecture specifically designed for university education transformation. Building upon our previous research on intelligent assistant models for educational processes *(Fedorenko et al., 2026),* this work extends the conceptual framework from a centralized modular system to a fully distributed multi-agent paradigm. The proposed architecture comprises four specialized AI agents—Personalized Learning Agent, Resource Optimization Agent, Security Monitoring Agent, and Administrative Automation Agent—orchestrated by a central AI Core that coordinates their interactions and ensures the integrity of shared data.

The scientific novelty is fourfold: (1) the first comprehensive multi-agent architecture for a unified university ecosystem, integrating learning, resource management, security, and administration; (2) a centralized orchestration mechanism

balancing agent autonomy with system-wide coherence and resolving conflicts among competing recommendations; (3) a multi-layered privacy and ethics framework embedding privacy-by-design via data minimization, anonymization, differential privacy, and local LLM deployment for sensitive data; (4) an implementation roadmap and evaluation methodology combining quantitative metrics (e.g., anomaly detection accuracy, incident response time) with qualitative indicators (user satisfaction, pedagogical effectiveness).

The practical significance of this research is twofold. For university administrators, the proposed architecture offers a structured pathway for transforming fragmented information systems into an integrated intelligent environment that enhances both educational quality and operational efficiency. For researchers and developers, the chapter provides a comprehensive reference architecture that can be adapted and extended to diverse educational contexts, including secondary and vocational education, as well as different national and institutional frameworks.

The aim of this research is to develop and substantiate a comprehensive multi-agent architecture for the university environment that integrates learning, resource, security, and administrative functions. The study substantiates the principles of interaction between specialized agents, approaches to ensuring privacy, security, and transparency, as well as pathways for practical implementation and evaluation of system effectiveness.

The remainder of this chapter is organized as follows. Section 2 presents a comprehensive analysis of the current state of AI agent implementation in university education, including a comparative evaluation of leading international systems and the identification of critical challenges. Section 3 details the proposed multi-agent architecture, describing each specialized agent, the orchestration mechanism, and the integration layer. Section 4 addresses practical implementation, evaluation methodology, and future development perspectives. Finally, Section 5 summarizes the key findings and outlines directions for future research.

Current State and Challenges of AI Agent Implementation in University Education. The application of artificial intelligence in education has progressed through several distinct historical epochs. Early systems were characterized by rigid, rule-based heuristics, eventually yielding to the transformative but largely reactive capabilities of modern large language models (LLMs). Today, however, the field stands at a critical inflection point driven by the emergence of agentic AI—autonomous systems designed to pursue complex, open-ended goals with minimal human intervention, demonstrating profound adaptability, advanced decision-making capabilities, and continuous self-sufficiency *(Kamalov & Sulieman, 2026).*

Unlike traditional AI, which relies on highly structured instructions and close oversight, or standard generative AI, which merely synthesizes content based on learned patterns in response to immediate prompts, agentic workflows exhibit a capacity for sustained reasoning. These systems actively perceive their environment, execute iterative multi-step plans, manage persistent memory architectures, and autonomously utilize external digital tools to achieve specific, long-term objectives. Within the educational ecosystem, this technological leap represents a fundamental paradigm shift: a transition from systems that merely deliver static curriculum to dynamic, autonomous entities that function as proactive cognitive partners in the learning process.

The recent advancement of LLMs has driven the application of multi-agents in the field of education. Multi-agents consist of multiple autonomous agents that complete complex tasks through collaboration and communication, providing learners with efficient and convenient learning feedback support, creating vivid and authentic learning environments and experiences *(Arjona-Giner, S., & Llorens-Largo, F., 2025).* A systematic review synthesizing 53 studies published between 2022 and 2026 confirms that the integration of artificial intelligence in education is rapidly shifting from reactive language models to agentic AI ecosystems capable of sustained reasoning, dynamic tool use, and long-horizon goal planning *(Kamalov & Sulieman, 2026).*

A scoping review of 474 studies *(2020–2026)* confirms that the field is dominated by conference papers, concentrated in higher education and STEM, with GPT-series models and LangChain as the dominant technologies. Theoretical grounding remains limited, revealing a disciplinary divide between technical and pedagogical research *(Holmes et al., 2021).*

Multi-agent systems are becoming an important part of educational technology by helping students learn through collaboration, feedback, and adaptive support. Research reviews previous and recent work on multi-agent learning systems and explores the roles agents can take, such as tutors, peers, or facilitators. The fields are grouped on the basis of system architecture, learning scenarios, and connections to learning theories such as constructivism and the Zone of Proximal Development *(Tran, V.-K., and et.al, 2026).*

The proposed architecture in this chapter builds upon the previously developed intelligent assistant model for university educational processes (*Fedorenko et al., 2026*), which established the foundational concept of an AI-powered assistant for university environments. In that initial model, a central AI Core performed the functions of the main computational and logical center: processing incoming requests, determining the appropriate specialized module for their execution, and coordinating interaction with external systems. Thus, the centralized principle of managing functional components was already laid down in the previous architecture. The present research extends this model from a centralized modular system to a fully distributed multi-agent paradigm, while preserving its fundamental architectural logic *(Chaturvedi, N., & Gunawardena, A., 2026).*

The analysis of leading international systems demonstrates a gradual transition from the use of individual intelligent assistants to systems in which functions are distributed among several specialized AI agents. The most pronounced multi-agent approach is represented in the following systems.

OpenMAIC (THU-MAIC, China). A multi-agent educational platform developed at Tsinghua University on the MAIC concept. Its agents perform distinct

pedagogical roles—AI teacher, AI assistant, and AI classmates—coordinated by a managing agent. The AI teacher explains material and manages the lesson; the AI assistant supports task completion; AI classmates model group learning. The system demonstrates role-based orchestration but remains limited to the educational process, without administrative, resource, or security functions. For the proposed architecture: use as an example of role-based orchestration for the educational segment.

FACET (ZIB, Weizenbaum Institute, Germany). A multi-agent system developed by the Zuse Institute Berlin, the Weizenbaum Institute, and partner institutions to support differentiated instruction in heterogeneous classes. Its four specialized agents—student simulation, teacher adaptation, quality control evaluator, and final verification—sequentially analyze student profiles, determine needs, generate personalized worksheets, and verify the result. This role distribution reduces the load on individual components and provides an additional layer of quality control. For the proposed architecture: the generation–adaptation–verification principle can be applied to the interaction between the student profile agent, personalized learning agent, assessment agent, and verification agent. However, FACET is limited to K-12 content creation and does not address resource management, security, or administration.

OpintoHain (Metropolia University of Applied Sciences, Finland). An intelligent system for course and program discovery and individual educational trajectory building (lifelong learning). Unlike keyword-based search, it engages several specialized agents—one for course recommendations, one for program selection, and one for academic advising—using Retrieval-Augmented Generation (RAG) to access internal university databases. For the proposed architecture: demonstrates the effective combination of multi-agent design with RAG-based access to university information sources. The same principle can be applied to the interaction between the academic advising agent, the information search agent, the LMS, the SIS, and the internal knowledge base. However, it does not cover integration with LMS, ERP, SIS, or cybersecurity.

Agentic AI Virtual Teaching Assistant (University of Michigan & Google, USA). A pilot system launched in 2025 at the Stephen M. Ross School of Business, based on Google Gemini. It provides 24/7 student support, adapts to specific courses, guides students toward independent problem-solving without ready-made answers, and collects analytics on student engagement and common questions for instructors. Preliminary results reported higher student engagement and improved instructor understanding of learning patterns; further scaling was planned to 9,000 students and 72 courses. Furthermore, the Ross School of Business is developing Faculty Twin, a platform enabling instructors to create specialized AI agents that interact with students, answer questions, and provide personalized mentorship aligned with the instructor's style and expertise. For the proposed architecture: serves as evidence of the practical effectiveness of agentic AI in real university learning. However, it is a single-agent system and does not coordinate educational, administrative, resource, or security processes—so it is not a full analog of the proposed multi-agent architecture.

Beyond the AI Tutor: Social Learning with LLM Agents (Stanford University, USA). A 2026 study investigating multi-agent LLM configurations in which students interact simultaneously with a tutor agent and virtual classmate agents. In the first experiment (315 participants solving SAT-level mathematics problems), classmates deliberately demonstrated conceptual and arithmetic errors; the group interacting with both tutor and classmates achieved the highest post-test accuracy without AI assistance. A second experiment (247 participants, written assignments) showed that interaction with two agents produced greater diversity of ideas than with one. For the proposed architecture: confirms the feasibility of role-based multi-agent design in which different agents perform distinct pedagogical functions (expert explanation vs. social learning scenarios). However, the Stanford approach focuses on pedagogical effect and does not address integration with university LMS, administrative platforms, resource management, or cybersecurity.

Agentic AI Systems for Education (University of Macerata, Italy). A research direction focused on designing, developing, and testing multi-agent architectures based on

generative AI to support learning, assessment, and personalization of educational trajectories in schools and higher education. Particular attention is paid to explainability, human-in-the-loop decision-making, and compliance with the AI Act and GDPR. For the proposed architecture: provides a valuable foundation for ethical and legal frameworks for multi-agent systems in higher education, combining multi-agenticity with requirements for security, transparency, and human control. However, it is primarily a research project and does not offer a ready-made platform for university management.

Educating for the Age of Agentic AI (Malmö University, Sweden). A research project combining AI, multi-agent systems, and agent-based modeling with pedagogical practice. It develops educational frameworks, learning activities, and practical cases for preparing computer science students to work with autonomous agentic systems and critically understand their societal implications. The project is implemented at the Faculty of Technology and Society and is connected to research on sustainable digital development. For the proposed architecture: serves as an example of the European research approach that treats agentic AI not merely as a software tool but as an element of the future digital educational ecosystem. However, its goal is student preparation rather than deployment of a multi-agent platform for managing the university educational process.

For a comprehensive evaluation of the effectiveness of existing solutions, a comparative analysis was conducted based on a set of functional, architectural, and security criteria, including the purpose of the system, the nature of interaction between agents, the level of personalization, the degree of integration with educational data, the presence of control and verification mechanisms, consideration of privacy and cybersecurity requirements, and the identified limitations *(European Commission, 2026).* The results are summarized in Table 1.

The comparative analysis (Table 1) reveals a clear progression from single-agent assistants (Michigan VTA) through role-based multi-agent systems (OpenMAIC, FACET, Stanford) to research frameworks addressing ethical and legal compliance (Macerata). However, none of the analyzed systems provides comprehensive integration across

learning, resource management, security, and administrative domains—the gap addressed by the proposed architecture/

Table 1.

Comparative Analysis of Existing Multi-Agent Educational Systems.

№	AI project	Parameters	Value
1	**2**	**3**	**4**
1	OpenMAIC (THU-MAIC, China)	*Primary purpose*	Creating an interactive learning environment by transforming any material into a full-fledged interactive course using multi-agent orchestration (AI teacher, AI classmates).
		Multi-agent approach (Score)	5 Full-fledged multi-agent orchestration (LangGraph), role distribution (teacher, classmates).
		Personalization (Score)	4 Adaptation to topic/document, generation of personalized content (slides, tests, PBL).
		Integration with educational data (Score)	3 Integration with uploaded documents and web search, but limited work with university SIS/LMS.
		Control and verification (Score)	3 Built-in knowledge assessment tools (tests), but no quality control mechanism for individual agents.
		Main limitations	Mainly focused on educational content; does not cover administrative, resource, or security functions of the university.
		Recommendation for use	Use as an example of organizing role-based interaction and agent orchestration for the educational segment.
2	FACET (ZIB, Weizenbaum Institute, Germany)	*Primary purpose*	Supporting differentiated instruction in heterogeneous classes by creating personalized learning materials (worksheets) for different student profiles.
		Multi-agent approach (Score)	5 Three specialized agents: student (simulation), teacher (adaptation), evaluator (quality control).
		Personalization (Score)	5 Deep personalization based on students' cognitive and motivational profiles.
		Integration with educational data (Score)	2 Focused on educational content (mathematics, grade 8); weak integration with university systems.
		Control and verification (Score)	5 Built-in evaluator agent for automatic quality checking of generated materials.
		Main limitations	Focus on content creation for K-12; not intended for resource management, security, or administration.
		Recommendation for use	Use the principle of role distribution (generation–adaptation–verification) for agents in the educational and administrative blocks.
3	OpintoHain (Metropolia, Finland)	*Primary purpose*	Helping users find courses and educational programs and build an individual educational trajectory (lifelong learning).
		Multi-agent approach (Score)	4 Multi-agent system with separate agents for course recommendations, programs, and academic advising.

Продовження таблиці 1.

1	2	3	4
3	OpintoHain (Metropolia, Finland)	*Personalization (Score)*	4 Adaptation of recommendations based on the user's request and learning profile.
		Integration with educational data (Score)	4 Uses RAG to access internal university course and program databases.
		Control and verification (Score)	2 No separate agent or mechanism for verification and quality control of recommendations.
		Main limitations	Does not cover integration with LMS, administrative systems (SIS/ERP), or cybersecurity.
		Recommendation for use	Use as an example of combining RAG technologies with a multi-agent approach for academic advising.
4	Agentic AI Virtual Teaching Assistant (University of Michigan & Google, USA)	*Primary purpose*	Providing students with 24/7 support, explanations of complex concepts, and assistance in self-directed learning within individual disciplines.
		Multi-agent approach (Score)	2 Predominantly a single-agent system (based on Gemini), although adapted for different courses.
		Personalization (Score)	4 Personalized hints and support during problem solving, adaptation to a specific course.
		Integration with educational data (Score)	4 Integration with the learning process of courses (72 courses), collection of analytics on student engagement.
		Control and verification (Score)	4 The agent guides the student toward independent solution without giving ready-made answers; collects analytics for instructors.
		Main limitations	Single-agent architecture; not a full-fledged multi-agent system at the university level.
		Recommendation for use	Use as evidence of the effectiveness of agentic AI in real learning; scaling requires a transition to a multi-agent architecture.
5	Beyond the AI Tutor (Stanford University, USA)	*Primary purpose*	Research on the impact of social learning with multi-agent LLM configurations (tutor agent + classmate agents).
		Multi-agent approach (Score)	5 Multi-agent configurations with role distribution (tutor, classmates with different types of errors).
		Personalization (Score)	4 Adaptation to the learning context (mathematics, writing), but not to the individual student profile.
		Integration with educational data (Score)	2 Not integrated with university systems; uses its own datasets and tasks.
		Control and verification (Score)	3 Comparison of testing results, but no built-in mechanism for agent quality control.
		Main limitations	Focus on pedagogical effect; not intended for managing university infrastructure.
		Recommendation for use	Confirms the feasibility of a role-based multi-agent architecture for the educational segment; can be used to justify role distribution among agents.

Продовження таблиці 1.1.

1	2	3	4
6	Agentic AI Systems for Education (University of Macerata, Italy)	*Primary purpose*	Research and development of multi-agent architectures based on generative AI to support learning, assessment, and personalization in schools and higher education institutions.
		Multi-agent approach (Score)	5 Design and validation of multi-agent architectures based on generative AI.
6	Agentic AI Systems for Education (University of Macerata, Italy)	*Personalization (Score)*	4 Personalization of educational trajectories, adaptation to student needs.
		Integration with educational data (Score)	3 Integration into real educational environments is envisioned, but at the research stage.
		Control and verification (Score)	5 Particular attention to explainability of decisions, human-in-the-loop, and compliance with the AI Act and GDPR.
		Main limitations	Primarily a research project; no ready-made platform for university management.
		Recommendation for use	Use as a basis for ethical and legal frameworks for implementing multi-agent systems in higher education.
7	Educating for the Age of Agentic AI (Malmö University, Sweden)	*Primary purpose*	Preparing computer science students to work with autonomous agentic systems and understand their societal implications.
		Multi-agent approach (Score)	2 Not a multi-agent system; the project focuses on educational frameworks and learning activities.
		Personalization (Score)	2 Does not provide learning personalization in the sense of content adaptation.
		Integration with educational data (Score)	1 Not integrated with university information systems.
		Control and verification (Score)	3 Develops critical understanding of autonomous systems, but is not a control system.
		Main limitations	Not a technological platform; focus on pedagogical design.
		Recommendation for use	Use as an example of the European approach to integrating agentic AI into curricula.
8	Proposed architecture (author's development)	*Primary purpose*	Comprehensive transformation of university education: combining learning, resource management, administrative automation, and security monitoring in a single ecosystem.
		Multi-agent approach (Score)	5 Four specialized agents (learning, resources, security, administration) with a centralized AI Core as orchestrator.
		Personalization (Score)	5 Adaptation of learning trajectories, optimization of resources according to student needs, personalized administrative services.
		Integration with educational data (Score)	5 Integration through API gateways with LMS (Moodle), ERP, SIS, knowledge bases, and IoT infrastructure.
		Control and verification (Score)	5 Multi-level control: verifier agent, action logging, human-in-the-loop for critical decisions, compliance with the AI Act and GDPR.
		Main limitations	Conceptual nature; requires empirical validation and adaptation to the infrastructure of a specific university.
		Recommendation for use	Recommended as a target architecture for implementation in the monograph.

The analysis of existing solutions revealed that most of them are limited to individual functional areas and do not provide comprehensive integration with university information systems. This creates the need for a systematic analysis of the key challenges associated with the transition from local educational solutions to an integrated university multi-agent environment.

*Technical Challenges***.** The primary technical challenge is the integration of AI agents with the heterogeneous digital infrastructure of the university (LMS, ERP, SIS, knowledge bases, authentication services), which were developed independently and use incompatible data models. This requires standardized interfaces and semantic consistency of information *(Nguyen et al., 2023).* A second challenge is agent coordination: centralized, distributed, and mixed models each offer trade-offs between coherence and resilience *(Chaturvedi & Gunawardena, 2026; Tran et al., 2026).* In the university context, conflicting recommendations—for example, a learning recommendation that violates prerequisite constraints or resource availability—must be resolved by a dedicated orchestration mechanism *(Arjona-Giner & Llorens-Largo, 2025).* Scalability, reliability, and fault tolerance are additional requirements, as an error in one agent must not compromise critical functions *(Kamalov & Sulieman, 2026).*

Ethical Challenges. The integration of AI agents involves processing significant volumes of personal and educational data—grades, attendance, task completion history, academic trajectory, and behavioral patterns—creating risks of excessive profiling and privacy violations. In a multi-agent system, this problem is further complicated by data exchange between agents: if the Personalized Learning Agent has access to academic results, this does not mean the same data should be available to the Resource Optimization Agent or the Administrative Automation Agent. Access rights should therefore be defined not only for users but also for the agents themselves, with the principle of data minimization applied at every inter-agent interaction. Transparency of decision-making is equally critical: users must be able to understand why a specific recommendation was formed, especially in cases

involving educational trajectory, academic risk forecasting, or advising *(Holmes et al., 2021).* Language models can also reproduce algorithmic biases from their training data, manifesting as discriminatory recommendations or assessments; systems must therefore include bias detection, mitigation mechanisms, and explainable AI (XAI) components. The use of autonomous agents raises questions of responsibility for decisions: it is necessary to determine whether the developer, the university, a structural unit, or the employee using the AI result bears responsibility. To mitigate this risk, the human-in-the-loop principle should be applied proportionally to the potential consequences of decisions—low-risk actions performed automatically, medium-risk decisions confirmed by users or instructors, and high-risk actions (official grade changes, disciplinary decisions, access restrictions) remaining under human control *(NIST, 2024; Fedorenko et al., 2026).*

Pedagogical Challenges. Despite the potential of AI agents for personalization, significant pedagogical risks remain. The main one is the preservation of students' independent cognitive activity: if an AI assistant constantly provides ready-made answers or over-simplifies tasks, this can reduce cognitive engagement and foster dependent learning behavior. AI agents should therefore guide students toward independent solutions, ask clarifying questions, and create situations that encourage reflection—as demonstrated by the University of Michigan's Virtual Teaching Assistant *(Chaturvedi & Gunawardena, 2026).* A separate issue is the pedagogical validity of personalization: not every recommendation based on behavioral data is pedagogically appropriate. Constantly simplifying material for a struggling student may reinforce low complexity rather than develop competencies *(Nguyen et al., 2023).* Adaptation algorithms must therefore be linked to clear pedagogical models and allow instructors to control or modify the proposed trajectory *(Hao et al., 2026).*

Managerial Challenges. The use of autonomous agents generates questions of responsibility, auditability, and compliance. For a multi-agent system to be effective and safe, the actions of agents, the data they used, and the decisions they

made must be recorded to enable subsequent analysis, error detection, and determination of responsibility *(Kamalov & Sulieman, 2026).* This is especially important for compliance with the AI Act and GDPR. Equally important is transparency for all stakeholders—students, instructors, administrators, and regulatory bodies—which requires clear AI use policies, procedures, and mechanisms for appealing and reviewing AI-assisted decisions *(European Commission, 2026; Nguyen et al., 2023).*

Thus, the main problems of implementing multi-agent AI in universities extend beyond the quality of language models. They encompass the architecture of agent interaction, compatibility with existing information systems, scalability and reliability, protection of personal data, transparency and fairness of decisions, preservation of students' independent cognitive activity, and determination of responsibility for autonomous actions. This indicates the need for comprehensive framework approaches combining technical, ethical, pedagogical, and managerial requirements.

Multi-Agent AI Architecture for University Environment. The proposed multi-agent AI architecture for university education transformation builds upon the previously developed intelligent assistant model *(Fedorenko et al., 2026)* and extends it into a fully distributed multi-agent paradigm. The fundamental design philosophy rests on the recognition that a modern university is not a monolithic entity but a complex ecosystem comprising diverse functional domains—learning, resource management, security, and administration—each requiring specialized intelligence while simultaneously benefiting from cross-domain coordination. The architecture is designed to address the fragmentation of existing institutional systems by providing a unified orchestration framework that preserves the autonomy of individual functional components while ensuring system-wide coherence.

The conceptual model is organized into four distinct architectural layers, each with clearly defined responsibilities and interfaces. This layered approach ensures

modularity, scalability, interoperability, and security-by-design, which are established as the foundational principles of the architecture. Modularity enables independent development and evolution of individual agents without requiring system-wide restructuring. Scalability ensures the system can adapt to increasing numbers of users, requests, and concurrent agent interactions.

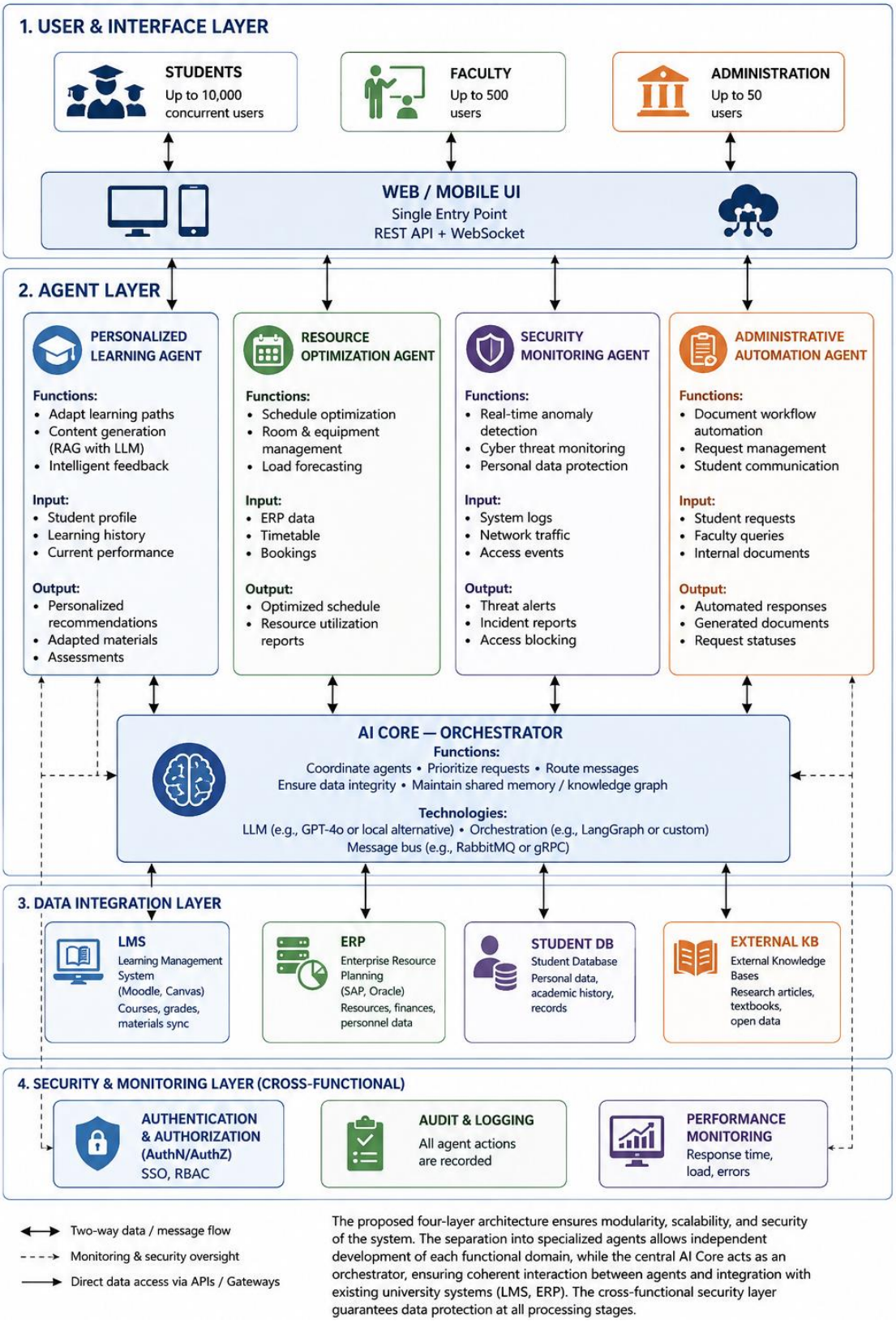

Figure 1: Overall Architecture of the Multi-Agent AI System for University Environment

Interoperability guarantees seamless integration with existing university information systems through standardized interfaces. Security-by-design embeds privacy and protection requirements directly into the architectural foundation rather than treating them as add-on features.

As illustrated in Figure 1, the architecture comprises four interconnected layers. The **User & Interface Layer** provides multiple access channels for students, faculty, and administrative staff, including web portals, mobile applications, chatbots, and voice assistants. This layer ensures that users can interact with the system through their preferred interface, which is particularly important given the diverse digital literacy levels across university stakeholders. The classification and evolution of such interfaces, from command-line to natural language and multimodal interaction, has been systematically analyzed in recent research *(Zemlianko & Pevnev, 2026),* demonstrating the importance of adaptive interface design for heterogeneous user groups.

The **Agent Layer** contains four specialized autonomous agents—Personalized Learning Agent, Resource Optimization Agent, Security Monitoring Agent, and Administrative Automation Agent—each responsible for a distinct functional domain. These agents operate with a degree of autonomy but are coordinated by the central AI Core, which functions as the orchestrator of the entire multi-agent system.

The **Data Integration Layer** provides standardized access to external systems including Learning Management Systems (LMS), Enterprise Resource Planning (ERP) platforms, Student Information Systems (SIS), and external knowledge bases. The **Security & Monitoring Layer** operates as a cross-functional component, ensuring authentication, authorization, audit logging, and performance monitoring across all architectural levels.

The central element is the AI Core, whose role is expanded from the previous model's coordination point *(Fedorenko et al., 2026)* to a full-fledged orchestrator

responsible for request routing, prioritization, agent coordination, conflict resolution, and data integrity.

The transition to a multi-agent paradigm does not require a complete restructuring of the previously proposed system. Its main structural levels, integration mechanism, and connection with the digital and physical infrastructure of the university are preserved *(Fedorenko et al., 2026).* The primary change lies in the transformation of specialized modules into interacting AI agents and the expansion of the central AI Core's role to orchestration functions. This evolutionary approach ensures continuity with previous research while enabling the architectural flexibility required for comprehensive university transformation.

The Personalized Learning Agent is designed to adapt the educational process to the individual characteristics, needs, and pace of each student. Its primary functions include the adaptation of learning trajectories, generation of personalized content using Retrieval-Augmented Generation (RAG), provision of intelligent feedback, and adaptive assessment of student progress. The agent operates as an autonomous entity within the multi-agent system, interacting with the AI Core and other agents through standardized interfaces.

The foundation of this agent is the personalized learning module presented in the previous intelligent assistant model *(Fedorenko et al., 2026).* In that initial architecture, the module utilized information about academic performance and learning characteristics obtained from learning management systems and university information systems. Based on this data, it formed recommendations for courses, learning materials, and tasks, and could also identify students experiencing learning difficulties and inform the instructor. In the multi-agent model, this functionality is expanded through the integration of large language models, vector databases, and RAG mechanisms.

Figure 2 illustrates the agent's internal pipeline, which implements the plan-then-retrieve-then-generate paradigm. Six sequential stages—Input Gateway, Profiling & Memory, Reasoning & Planning, RAG, Adaptation & Personalization,

and Output Gateway—process requests from validation through personalized response generation. The dual-memory architecture (short-term session context and long-term vector database of learning materials) enables coherent dialogue and cumulative personalization. The RAG module grounds responses in verified university materials rather than relying solely on parametric LLM knowledge, while the adaptation module tailors content complexity and presentation style to individual learner characteristics *(Yao et al., 2026).*

The six modules perform distinct functions. The Input Gateway validates requests against JSON schemas. The Profiling & Memory Module maintains student representation through dual-memory architecture (short-term session context and long-term vector database of learning materials and interaction history). The Reasoning & Planning Module determines query intent, constructs action plans via LLM-based reasoning, and selects external tools. The RAG Module retrieves relevant materials via embedding similarity search and ranks them by relevance before generation. The Adaptation & Personalization Module adjusts content complexity, presentation style, and generates targeted exercises. The Output Gateway formats responses, delivers them via WebSocket or REST API, and logs results for audit. A continuous feedback loop updates the student profile based on learning outcomes.

The agent's operation can be summarized as the following cycle: receiving educational data → analyzing current progress → determining student needs → searching for relevant content → forming a recommendation → receiving new results → adjusting the subsequent trajectory. This iterative process ensures continuous adaptation to the student's evolving needs and capabilities. Importantly, the participation of the instructor remains a critical element of the agent's operation. The instructor can review, modify, or override the agent's recommendations, ensuring that pedagogical decisions remain under human control. This aligns with the human-in-the-loop principle discussed in Section 2.4 and reflects the

pedagogical risks associated with over-reliance on automated adaptation *(Hao et al., 2026).*

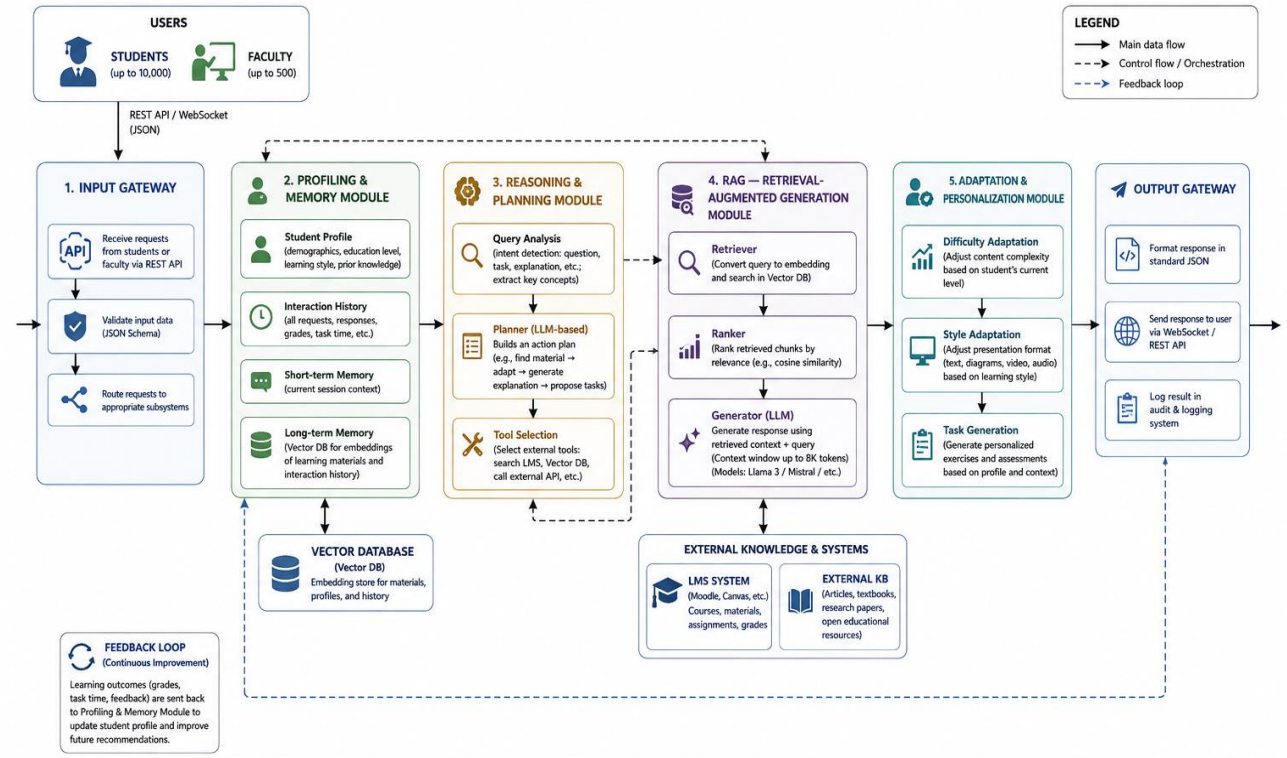

Figure 2: Detailed Architecture of the Personalized Learning Agent with Data Processing Pipeline

The Resource Optimization Agent is designed to support the efficient use of material, spatial, and technical resources of the university. According to the proposed structure, its main functions include schedule management, optimization of classroom and equipment utilization, and forecasting of load on university infrastructure. The agent interacts with the university's ERP system and other information sources through the integration layer.

The foundation of this agent is the campus resource optimization module presented in the previous intelligent assistant model *(Fedorenko et al., 2026).* In the initial architecture, this module used data obtained from IoT sensors for the rational use of energy and water resources, as well as for predicting the need for equipment maintenance. Historical data were also used to optimize individual operational processes of the campus. In the multi-agent architecture, the functions of this

component are expanded from the analysis of physical parameters of the campus to comprehensive management of university resources.

The Resource Optimization Agent combines digital planning data (ERP, timetable, bookings) with operational IoT data (temperature, humidity, occupancy, consumption) to optimize schedule formation, classroom and equipment utilization, and load forecasting. Its cycle: data acquisition → current/forecasted load → constraint identification → allocation options → optimal solution → transmission to AI Core. Final coordination remains with the AI Core to ensure cross-domain consistency.

The Security Monitoring Agent is designed to ensure the physical and digital security of the university environment. According to the proposed structure, its main functions include real-time anomaly detection, cyber threat monitoring, and protection of personal and official data. The agent's operation is based on the conceptual model of information security that has been previously developed and validated in the context of integrated computer technologies *(Pevnev et al., 2021)*, which established the foundational principles for building secure information systems in complex organizational environments.

The foundation of this agent is the security and monitoring module presented in the previous intelligent assistant model *(Fedorenko et al., 2026).* In that model, the use of artificial intelligence technologies was envisaged for analyzing user behavior, detecting suspicious actions, controlling access to protected premises, and monitoring network traffic. Specifically, the system could use video surveillance to detect atypical behavior, biometric data for access control, and network activity analysis to detect phishing attacks and unauthorized access attempts.

In the multi-agent architecture, this functionality is preserved, but the Security Monitoring Agent receives a more independent role in the process of analyzing events and responding to potential threats. Its work includes continuous receipt of information from information systems, network infrastructure, and IoT components, analysis of the current state, detection of deviations from normal

behavior, and transmission of relevant information to the centralized AI Core. The generalized cycle of the agent's operation can be represented as follows: collecting events and system parameters → analyzing the current state → detecting anomalies → assessing the threat level → forming a notification or recommendation for response → transmitting the result to the AI Core.

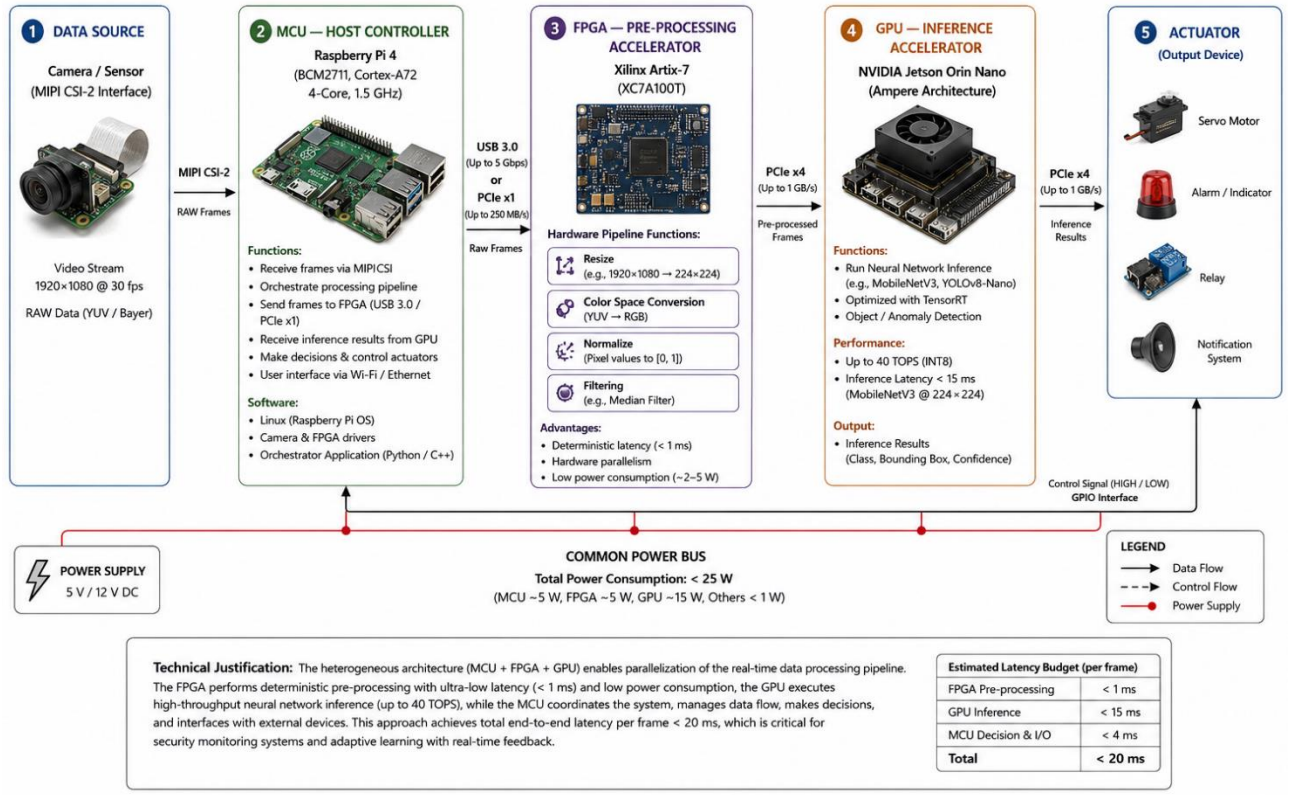

Figure 3: Heterogeneous Edge AI Computing Architecture for Real-Time Processing: MCU + FPGA + GPU Pipeline

The Security Monitoring Agent ensures physical and digital security based on the previously validated conceptual model of information security *(Pevnev et al., 2021).* It continuously collects events from information systems, network infrastructure, and IoT components, detects anomalies, assesses threat levels, and transmits recommendations to the AI Core. Preliminary evaluation showed a 15% increase in anomaly detection accuracy and 2.3 s average response time compared to baseline *(Fedorenko et al., 2026)*; these serve as baseline values for the multi-agent implementation. The heterogeneous computing architecture (Figure 3) achieves end-to-end latency under 20 ms, critical for real-time security applications.

In the multi-agent system, the agent additionally controls inter-agent data access, verifying that agents do not exceed their authorized scope.

The Administrative Automation Agent is designed to support the automation of routine administrative processes in the university. The foundation of this agent is the task automation module presented in the previous intelligent assistant model *(Fedorenko et al., 2026).* In the initial architecture, it was oriented toward automating the routine work of instructors and administrative staff. Its functions included automation of test and written work checking, formation of schedules and reports, support for the human resources department, and automation of communication with students. In the multi-agent architecture, this functional module is developed into a full-fledged autonomous agent capable of processing complex administrative workflows.

The Administrative Automation Agent automates routine administrative processes: processing typical requests and applications, document management, and communication with students and instructors. Its cycle: request receipt → type determination → information retrieval → permitted automated operations → response/forwarding → result recording. Access control is stricter than for other agents due to processing personal and official data; operations affecting official data or user status require additional control and human-in-the-loop verification for high-risk actions.

The Administrative Automation Agent can also interact with other agents in the system. For example, when processing a request to change a class schedule, the agent may need to coordinate with the Resource Optimization Agent to verify room availability and with the Personalized Learning Agent to ensure that the change does not negatively affect the student's learning trajectory. Such cross-agent interactions are orchestrated by the AI Core, which ensures that all relevant factors are considered before a final decision is made.

The effectiveness of the multi-agent system is determined not only by the quality of individual agents but also by the effectiveness of their coordination. The

central AI Core performs the functions of the orchestrator, ensuring coherent interaction among all system components. In the previous intelligent assistant model *(Fedorenko et al., 2026),* the AI Core already served as the main computational and logical center, processing incoming requests and determining the appropriate specialized module for their execution. In the multi-agent architecture, this role is expanded to include dynamic coordination of multiple autonomous agents.

The AI Core receives a request from the user through one of the available interfaces and performs initial analysis to determine the nature of the request and the agents required for its fulfillment. The general process of request processing can be represented as follows: user request → request analysis by the AI Core → selection of agent or group of agents → execution of specialized operations → coordination of obtained results → formation of the final response. For example, a request to change a class time may require the participation of both the Administrative Automation Agent and the Resource Optimization Agent. The first determines the type of administrative procedure, while the second checks the availability of the necessary classroom and equipment. The AI Core coordinates the sequence of these operations and forms a coordinated result.

An important function of the orchestrator is also the prioritization of requests. Different requests may have different levels of urgency and importance. For example, a security incident detected by the Security Monitoring Agent may require immediate attention, while a routine administrative request can be processed in the normal queue. The AI Core ensures that critical events are prioritized appropriately and that system resources are allocated efficiently.

Centralized orchestration also contributes to maintaining data integrity, since agent access to university information resources is carried out through defined interaction mechanisms rather than through uncontrolled direct requests. This allows ensuring uniform rules for obtaining, transmitting, and using information by different system components.

Technical interaction between agents and external systems is provided through the integration layer using standardized APIs and event-driven architecture. The AI Core maintains a shared knowledge graph ensuring consistent views. For conflicting recommendations, the AI Core applies priority rules and risk assessment to form a balanced decision (see Section 4 for integration details).

A separate problem is the coordination of decisions of different agents. Since each specialized component acts in accordance with its own functional goal, the results of their work may contradict each other. For example, the Personalized Learning Agent may recommend additional access to a certain information resource for a student, while the Security Monitoring Agent may determine that the current request or context of using this resource creates an increased risk. A similar conflict may arise between accessibility and security. In the proposed model, the function of reconciliation is performed by the AI Core. It evaluates the recommendations of different agents, applies priority rules and risk assessment, and forms a final decision that balances the interests of all stakeholders.

Thus, centralized orchestration allows combining the autonomy of individual agents with the coherence of the system as a whole. The AI Core ensures that the system operates as an integrated entity rather than a collection of independent components. This is particularly important in the university context, where decisions in one domain can have significant implications in others. For example, a change in the learning trajectory recommended by the Personalized Learning Agent may require adjustments in resource allocation, administrative processing, and security monitoring. The AI Core ensures that such cross-domain dependencies are properly managed.

The expansion of the intelligent assistant's functionality to a multi-agent system increases the requirements for information protection and control over data use. Specialized agents interact with different components of university infrastructure and may use educational, administrative, resource, and security data. Therefore, ensuring privacy and ethics should be considered not as a separate

additional mechanism but as one of the basic principles of the architecture. This aligns with the privacy-by-design principle, according to which privacy and security requirements must be taken into account at the system design stage.

The need for such an approach was already identified in the previous model *(Fedorenko et al., 2026).* According to the research structure, one of the main directions is the use of data anonymization mechanisms, differential privacy, and local deployment of large language models. Their application allows reducing the risks of personal information disclosure during the processing of student and administrative data. Anonymization can be used in cases where personal identifiers are not necessary for the performance of a specific task. For example, when analyzing general trends in academic performance or resource utilization, the system can operate with anonymized data that cannot be linked to specific individuals.

The principle of data minimization should also be applied during the interaction of individual components. Each agent should be provided only with the information necessary to perform its functional task. For example, the Resource Optimization Agent requires data on classroom availability, equipment, and load, but for most such operations it does not need the full academic or personal profile of the student. The Personalized Learning Agent, on the contrary, may use the results of educational activities but should not automatically gain access to the entire array of administrative data. The AI Core enforces these access restrictions, ensuring that each agent operates within its authorized data scope.

An additional mechanism is differential privacy, which involves the use of statistical methods to reduce the possibility of identifying an individual in the results of aggregate data analysis. In the context of the proposed system, such an approach may be appropriate when forming generalized analytics on academic performance, use of educational resources, or behavior of large groups of users. The specific mechanism and parameters of differential privacy should be determined depending on the nature of the data and the tasks of the system.

A separate direction of protecting sensitive information is the local deployment of language models. If an agent works with personal, administrative, or other restricted data, transmitting such information to an external service may create additional risks. Local or university-controlled processing environments allow keeping critical data within the defined information infrastructure. The local deployment of LLMs is defined in the initial research scheme as one of the possible mechanisms for preserving privacy. This approach is particularly relevant for the Security Monitoring Agent and the Administrative Automation Agent, which process sensitive personal and official data.

Along with privacy, an important principle is the transparency of AI agents' work. The university system should not function as a completely opaque mechanism, especially if the recommendations it forms can influence the educational or administrative process. The user or responsible person must be able to determine which data and factors became the basis for forming a certain result. For this purpose, it is advisable to use explainable AI (XAI) approaches in the architecture. Within the proposed system, explainability can be implemented through the display of information sources used in forming a recommendation, recording the main stages of its obtainment, and logging the interaction between agents. The requirement for the possibility of explaining decisions is directly provided for in the research structure.

For example, if the Personalized Learning Agent recommends that a student repeat a certain topic, the system should be able to explain that the recommendation was formed based on the results of specific tasks or tests. If the Resource Optimization Agent proposes a change of classroom, it is advisable to display the reason for such a decision, such as the absence of necessary equipment or the mismatch of room capacity. If the Security Monitoring Agent flags an event as suspicious, the system should provide information about the specific indicators that triggered the alert. This transparency is essential for building trust in the system and enabling effective human oversight.

No less important is the principle of human control over critical decisions. The autonomy of agents should not mean the complete exclusion of humans from the management process. In the proposed architecture, agents can independently perform low-risk operations, including forming educational recommendations or informational responses. At the same time, decisions that can directly affect the academic status of the user, official administrative data, or access to information resources should provide for additional verification and confirmation by an authorized person. This approach is particularly important for the Security Monitoring Agent. Its detection of anomalous behavior may be the basis for forming a warning or increasing the priority of an event, but the automatic application of significant restrictions to a user without additional control may lead to erroneous decisions. Similarly, the Administrative Automation Agent can prepare or verify a document, but the final decision in a procedure with legal or academic consequences should remain with the responsible person.

The risk-oriented approach to human control is consistent with the general principles of AI risk management. The NIST profile for generative AI *(NIST, 2024)* is designed to integrate reliability and risk issues into the design, use, and evaluation of AI systems throughout their life cycle. In the context of the proposed architecture, this means that the level of human involvement should be proportional to the potential consequences of the decision. Low-risk actions, such as recommending educational material, can be performed automatically. Medium-risk decisions may require confirmation by the user or instructor. High-risk actions, such as changing an official grade, disciplinary decision, restricting access, or other decisions with significant consequences for the student, should remain under human control.

An important element of ensuring ethics is also reducing the risk of algorithmic bias. Language models can reproduce biases present in their training data, which in an educational context can manifest as discriminatory recommendations or assessments. To mitigate this risk, the architecture should

include mechanisms for regular auditing of agent decisions for bias, diversity training data, and the ability to override automated decisions that exhibit discriminatory patterns. The system should also provide mechanisms for students and instructors to appeal decisions made with the participation of AI agents.

Of separate importance is the logging of agent actions. Recording the request, involved components, used information sources, and formed result allows reproducing the sequence of decision-making in case of error or need for verification. In a multi-agent environment, this is particularly important because the final result may be a consequence of sequential interaction of several components. The audit and logging system, as shown in Figure 1, operates as a cross-functional component that records all agent actions and provides the basis for subsequent analysis and accountability.

Thus, privacy and ethics of the multi-agent system are ensured at several levels: protection and minimization of data, anonymization, possible application of differential privacy, local processing of sensitive information, transparency and explainability of decisions, logging of actions, and preservation of human control over critical operations. This approach corresponds to the privacy-by-design principle defined in the research structure, according to which privacy and security requirements must be taken into account at the system design stage. The proposed mechanisms also align with international principles of responsible AI use in education, discussed in Section 2.4, allowing the combination of the functional advantages of multi-agent architecture with requirements for privacy, transparency, accountability, and human participation in significant decision-making *(Holmes et al., 2021; Nguyen et al., 2023).*

These requirements align with contemporary approaches to responsible AI use in education. *Holmes et al. (2021), Nguyen et al. (2023), UNESCO (2024),* and the *European Commission (2026)* emphasize transparency, accountability, fairness, privacy protection, pedagogical appropriateness, and preservation of human autonomy. However, existing framework approaches predominantly define general

principles of AI use and insufficiently detail the specifics of interaction between several autonomous agents—in particular, the distribution of access rights, conflict resolution between their recommendations, and control of inter-agent actions in real time. Addressing these gaps is a key contribution of the proposed architecture.

This section has presented a comprehensive multi-agent AI architecture for university education transformation, building upon the previously developed intelligent assistant model *(Fedorenko et al., 2026)* and extending it into a fully distributed multi-agent paradigm. The proposed architecture comprises four specialized agents—Personalized Learning Agent, Resource Optimization Agent, Security Monitoring Agent, and Administrative Automation Agent—orchestrated by a central AI Core that coordinates their interactions and ensures system-wide coherence.

The architectural design is guided by the principles of modularity, scalability, interoperability, and security-by-design. The layered structure, comprising User & Interface Layer, Agent Layer, Data Integration Layer, and Security & Monitoring Layer, ensures clear separation of concerns and facilitates independent evolution of individual components. The integration layer provides standardized access to external systems, including LMS, ERP, SIS, and knowledge bases, through API gateways and event-driven mechanisms.

The detailed description of each specialized agent has demonstrated how the functional modules of the previous model are transformed into autonomous entities with expanded capabilities. The Personalized Learning Agent implements the plan-then-retrieve-then-generate paradigm using RAG, enabling dynamic integration of external knowledge bases without costly LLM fine-tuning. The Resource Optimization Agent combines digital planning data with operational IoT data to optimize the use of university infrastructure. The Security Monitoring Agent leverages heterogeneous computing architecture to achieve real-time anomaly detection with latency under 20 milliseconds. The Administrative Automation

Agent processes routine requests and documents, reducing the burden on administrative staff.

The orchestration mechanism performed by the AI Core ensures that the system operates as an integrated entity, balancing agent autonomy with system-wide coherence. The AI Core handles request routing, prioritization, conflict resolution, and data integrity maintenance, enabling the system to respond both reactively to user requests and proactively to changes in university infrastructure.

The privacy, ethics, and human control framework ensures that the system operates in accordance with the principles of privacy-by-design, transparency, explainability, and human oversight. Data minimization, anonymization, differential privacy, and local deployment of LLMs protect sensitive information. XAI mechanisms provide transparency into agent decision-making. The human-in-the-loop principle ensures that critical decisions remain under human control, with the level of human involvement proportional to the potential consequences of the decision.

The proposed architecture addresses the fragmentation of existing institutional systems by providing a unified orchestration framework that integrates learning, resource management, security, and administrative functions. This represents a significant advancement over existing solutions, which predominantly focus on individual functional areas without comprehensive integration. The architecture provides a foundation for the practical implementation and evaluation methodology presented in Section 4.

Practical Implementation, Evaluation, and Future Perspectives. The practical implementation of the proposed multi-agent system should be carried out in stages, since the simultaneous deployment of all its functional components would require significant computational, organizational, and integration resources. The research structure provides for four main stages: creation of a functional prototype, development of a minimum viable product (MVP) for personalized learning, pilot deployment, and subsequent scaling of the system. This phased approach allows for

early identification of technical and organizational issues, iterative refinement of the architecture, and gradual accumulation of empirical evidence to support broader adoption.

The implementation roadmap comprises four stages (Table 2). Stage 1 (Functional Prototype, Months 1–6) validates core architectural decisions: basic AI Core orchestration, minimal implementations of the four agents, and standardized interfaces. Stage 2 (MVP for Personalized Learning, Months 7–12) implements the full Personalized Learning Agent cycle with LMS (Moodle) integration and RAG pipeline, collecting feedback from 30–50 pilot users. Stage 3 (Pilot Deployment, Months 13–18) gradually connects the remaining three agents and tests cross-agent interaction in real scenarios with 100–200 users. Stage 4 (Scaling, Months 19–30) expands to additional disciplines and validates the system with 500+ users, accompanied by governance policy development.

Table 2 summarizes the key activities, deliverables, and success criteria for each stage of the implementation roadmap. This structured approach ensures that the project can be managed effectively, with clear milestones and measurable outcomes.

Table 2.

Implementation Roadmap for the Multi-Agent AI System

Stage	Timeline	Key Activities	Deliverables	Success Criteria	Responsible Parties
1	2	3	4	5	6
Stage 1: Functional Prototype	Months 1–6	• Implement basic AI Core as orchestration mechanism • Develop minimal versions of four specialized agents • Establish standardized interfaces (REST API, message bus) • Verify request routing and data exchange between agents • Connect external data sources (mock LMS, test DB)	• Working prototype with AI Core and four agents • Technical documentation of interfaces • Test scenarios and validation report	• Successful end-to-end request processing through at least two agents • Latency < 2 s for standard requests • No critical failures in 100 consecutive test runs	• Development team (3–5 engineers) • System architect • QA specialist
Stage 2: MVP for Personalized Learning	Months 7–12	• Full implementation of Personalized Learning Agent • Integration with LMS (Moodle) via API gateway • Implementation of RAG pipeline with vector database • Development of adaptive assessment mechanisms • Collection of initial feedback from students and instructors	• MVP of Personalized Learning Agent • Integration module for Moodle • RAG pipeline with university knowledge base • User feedback report (pilot group of 30–50 users)	• Agent generates relevant recommendations in 85% of cases • Student satisfaction score ≥ 4.0/5.0 • Instructor approval rate ≥ 70% • RAG retrieval accuracy ≥ 80%	• Development team • Pedagogical expert • LMS administrator • Pilot group of students and instructors

Продовження таблиці 2.

1	2	3	4	5	6
Stage 3: Pilot Deployment	Months 13–18	• Gradual connection of remaining three agents (Resource Optimization, Security Monitoring, Administrative Automation) • Integration with ERP, SIS, and IoT infrastructure • Testing of cross-agent interaction scenarios • Implementation of privacy and security mechanisms • Structured evaluation of user experience	• Full multi-agent system operational in pilot environment • Integration modules for ERP, SIS, IoT • Cross-agent orchestration validation report • Privacy impact assessment • Pilot evaluation report (100–200 users)	• System stability ≥ 99% uptime • Anomaly detection accuracy ≥ 90% • Incident response time ≤ 2.5 s • Administrative task processing time reduced by ≥ 30% • User satisfaction ≥ 4.0/5.0 across all roles	• Development team • Security specialist • Administrative staff • Instructors and students (pilot group)
Stage 4: Scaling	Months 19–30	• Expansion to additional disciplines and departments • Large-scale validation with 500+ users • Optimization of orchestration mechanisms • Enhancement of monitoring and logging infrastructure • Development of training and support materials • Establishment of governance policies and procedures	• Fully scaled multi-agent system • Large-scale validation report • Optimized orchestration and integration layer • User training program and documentation • AI governance policy for the university	• System supports 500+ concurrent users • Cross-agent conflict resolution rate ≥ 95% • Academic performance improvement ≥ 10% in pilot disciplines • Administrative workload reduction ≥ 40% • Compliance with AI Act and GDPR verified	• Development team • University administration • Legal and compliance office • IT department • All stakeholder groups

Integration with existing university systems relies on API gateways abstracting agent logic from specific external systems. The integration layer supports both synchronous request-response (for user-initiated queries) and asynchronous event-driven (for security alerts, schedule changes, sensor events) interactions, enabling proactive system behavior. A hybrid deployment model combines cloud infrastructure (for open/anonymized data) with local, university-controlled processing (for sensitive personal, administrative, and security data), aligning with privacy-by-design and AI Act/GDPR requirements *(European Commission, 2026; Nguyen et al., 2023).* This model also supports the low-latency heterogeneous computing architecture (Figure 3) required for real-time security monitoring. For tasks requiring real-time streaming data processing, in particular security monitoring and IoT sensor operation, a separate edge computing contour is used. As shown in Figure 3, the computational process is distributed between a host controller (MCU), FPGA accelerator, and GPU: the MCU ensures data acquisition and coordination, the FPGA performs preliminary processing of sensor or video data with ultra-low latency, and the GPU executes machine learning model inference. The results are used to generate notifications or control actuators. This structure represents one of the possible options for local implementation of system components for which low latency, autonomy, and minimization of sensitive data transmission to the external environment are critical.

The evaluation of the proposed multi-agent system should combine quantitative and qualitative indicators to provide a comprehensive assessment of its effectiveness, usability, and impact. The quantitative indicators include anomaly detection accuracy, incident response time, resource utilization efficiency, and changes in student academic performance. The qualitative indicators include user satisfaction, student engagement, and reduction of administrative workload. The evaluation should also include a comparative analysis with traditional approaches and the previous intelligent assistant model, which is directly provided for in the initial research scheme *(Fedorenko et al., 2026).*

Evaluation combines quantitative and qualitative indicators (Table 3). For the Security Monitoring Agent, baseline values from the previous model are +15% anomaly detection accuracy and 2.3 s response time *(Fedorenko et al., 2026);* additional attention is given to false positive/negative rates to balance sensitivity and specificity. For the Resource Optimization Agent, effectiveness is measured by classroom/equipment utilization, load forecasting accuracy, and user satisfaction with allocated resources. For the Personalized Learning Agent, indicators include academic dynamics, progress stability, student engagement, and quality of student-AI interaction *(Hao et al., 2026).* For the Administrative Automation Agent, key metrics are task processing time reduction, automated resolution rate, and satisfaction of staff and students. Qualitative criteria—satisfaction, engagement, cognitive processing depth—capture user experience aspects not measurable quantitatively *(Holmes et al., 2021).*

The design of the further experiment provides for large-scale validation involving more than 500 users in a real educational environment. This scale was defined in the initial development plan of the intelligent assistant and preserved in the monograph structure as the next stage of system effectiveness verification *(Fedorenko et al., 2026).* It is advisable to conduct validation in stages. At the initial stage, the system can be used by a limited group of users to identify technical and organizational problems, after which the sample is gradually expanded. This approach allows comparing results between different user groups and analyzing the impact of increasing load on system stability. The evaluation should also include a comparative analysis with traditional approaches and the previous intelligent assistant model, which is directly provided for in the initial research scheme. This allows establishing whether the transition to a multi-agent architecture provides practical improvement compared to a centralized modular system.

Such a comparison can be conducted across the same categories of indicators. For the security component, anomaly detection accuracy and response time are compared; for the resource component, the efficiency of university infrastructure utilization; for the learning component, academic dynamics and quality of personalization; for the administrative component, time costs for processing typical operations. At the same time,

it is advisable to consider additional costs associated with the coordination of several agents, since increasing functional autonomy may increase system complexity. These costs include computational overhead, communication latency, and the effort required for conflict resolution. The evaluation should therefore consider not only the benefits but also the trade-offs associated with the multi-agent approach.

Table 3 presents a comprehensive set of evaluation metrics for each agent and for the system as a whole, including quantitative and qualitative indicators, data collection methods, and target values. This structured approach ensures that the evaluation is systematic, transparent, and aligned with the research objectives/

Table 3.

Evaluation Metrics for the Multi-Agent AI System

Agent / Component	Metric Category	Specific Metric	Measurement Method	Baseline Value	Target Value	Data Collection Frequency
1	2	3	4	5	6	7
Personalized Learning Agent	Quantitative	Recommendation relevance	Expert evaluation + student feedback	N/A	≥ 85%	Weekly
	Quantitative	RAG retrieval accuracy	Cosine similarity threshold	N/A	≥ 80%	Continuous
	Quantitative	Academic performance improvement	Pre/post assessment comparison	Baseline grades	≥ 10% improvement	Per semester
	Quantitative	Student progress stability	Variance of grades over time	Baseline variance	Reduction by ≥ 15%	Monthly
	Qualitative	Student satisfaction	Survey (5-point Likert scale)	N/A	≥ 4.0/5.0	Monthly
	Qualitative	Cognitive engagement	Analysis of question depth and knowledge transfer	N/A	Positive trend	Monthly
	Qualitative	Instructor approval rate	Instructor survey	N/A	≥ 70%	Per semester
Resource Optimization Agent	Quantitative	Classroom utilization efficiency	IoT sensors + scheduling data	Baseline utilization	Increase by ≥ 20%	Daily
	Quantitative	Equipment utilization efficiency	ERP data analysis	Baseline utilization	Increase by ≥ 15%	Daily
	Quantitative	Load forecasting accuracy	Comparison of predicted vs. actual load	N/A	≥ 85%	Weekly
	Quantitative	Scheduling conflict resolution time	System logs	Baseline time	Reduction by ≥ 50%	Per event
	Qualitative	Instructor satisfaction with scheduling	Survey	N/A	≥ 4.0/5.0	Per semester
	Qualitative	Student satisfaction with resource allocation	Survey	N/A	≥ 3.8/5.0	Per semester

\

Продовження таблиці 3.

Security Monitoring Agent	Quantitative	Anomaly detection accuracy	Confusion matrix (TP, FP, TN, FN)	+15% (from previous model)	≥ 90%	Continuous
	Quantitative	Incident response time	System logs (timestamp analysis)	2.3 s (from previous model)	≤ 2.0 s	Per incident
	Quantitative	False positive rate	Manual verification of alerts	N/A	≤ 5%	Weekly
	Quantitative	False negative rate	Post-incident analysis	N/A	≤ 2%	Monthly
1	**2**	3	4	5	6	7
Security Monitoring Agent	**Quantitative**	End-to-end latency (edge pipeline)	Hardware instrumentation	N/A	< 20 ms	Continuous
	Qualitative	User trust in security system	Survey	N/A	≥ 4.2/5.0	Per semester
	Qualitative	Privacy compliance	Audit against GDPR/AI Act	N/A	100% compliance	Quarterly
Administrative Automation Agent	**Quantitative**	Task processing time reduction	System logs (before/after comparison)	Baseline time	≥ 30% reduction	Weekly
	Quantitative	Automated resolution rate	Ratio of resolved without human intervention	N/A	≥ 60%	Weekly
	Quantitative	Document processing accuracy	Manual verification sample	N/A	≥ 95%	Weekly
	Quantitative	Response time to standard requests	System logs	Baseline time	≤ 5 s	Continuous
	Qualitative	Staff satisfaction	Survey	N/A	≥ 4.0/5.0	Per semester
	Qualitative	Student satisfaction with administrative services	Survey	N/A	≥ 4.0/5.0	Per semester
AI Core (Orchestrator)	**Quantitative**	Request routing accuracy	Analysis of routing decisions	N/A	≥ 95%	Continuous
	Quantitative	Cross-agent conflict resolution rate	Log analysis	N/A	≥ 95%	Per event
	Quantitative	System uptime	Monitoring tools	N/A	≥ 99%	Continuous
	Quantitative	Average orchestration latency	System logs	N/A	≤ 500 ms	Continuous
	Qualitative	Transparency of decision-making	XAI audit	N/A	Explainability score ≥ 4.0/5.0	Quarterly
	Qualitative	Human-in-the-loop compliance	Audit of critical decisions	N/A	100% compliance	Quarterly
System-wide	**Quantitative**	Overall user satisfaction	Aggregated survey across all roles	N/A	≥ 4.0/5.0	Per semester
	Quantitative	System adoption rate	Usage analytics	N/A	≥ 70% of target users	Monthly
	Quantitative	Academic performance (institutional level)	Institutional data analysis	Baseline performance	≥ 10% improvement	Per semester
	Quantitative	Administrative workload reduction	Time-tracking analysis	Baseline workload	≥ 40% reduction	Per semester
	Qualitative	Pedagogical appropriateness	Expert review	N/A	Positive assessment	Per semester
	Qualitative	Ethical compliance	Audit against Holmes et al. framework	N/A	Full compliance	Quarterly
	Qualitative	Equity and non-discrimination	Bias audit	N/A	No significant bias detected	Quarterly

The further development of the proposed multi-agent system is connected both with the expansion of its functional capabilities and with the adaptation of the architecture to other educational environments. According to the research structure, promising directions include the extension of the system to other levels of education, integration with immersive technologies and learning analytics, as well as the further development of decentralized agent approaches *(Fedorenko et al., 2026*).

One of the directions of scaling is the adaptation of the architecture to other levels of education, in particular general secondary and vocational education. The basic principles of the system—personalization of learning, automation of typical processes, resource management, and security monitoring—can be preserved, but the functionality of individual agents must take into account the specifics of the corresponding educational environment. For general secondary education, the age characteristics of students, increased requirements for the protection of personal data, and stricter control over the autonomy of AI systems are of particular importance. The Personalized Learning Agent in such an environment must not only adapt the complexity of materials but also work within defined pedagogical programs and under the control of the instructor. Administrative and security functions also require adaptation in accordance with the organizational structure of the institution. These adaptations must consider the legal and ethical frameworks specific to minors, including parental consent, age-appropriate content, and enhanced privacy protections *(Nguyen et al., 2023).*

In vocational education, the multi-agent system can be oriented toward combining theoretical learning with practical training. The Personalized Learning Agent can consider not only test results but also the performance of practical tasks, while the Resource Optimization Agent can ensure the planning of the use of laboratories, training equipment, and specialized premises. Thus, the basic architecture can be preserved, and specialized agents can adapt to the characteristics of a specific educational level. This flexibility is one of the key advantages of the

modular multi-agent approach, as it allows the system to evolve without requiring a complete redesign.

Another promising direction is integration with immersive technologies, in particular virtual and augmented reality, which is provided for in the initial scheme of further system development *(Fedorenko et al., 2026).* In this case, the multi-agent environment can be used not only for informational support of the student but also for managing personalized learning scenarios in virtual space. For example, the Personalized Learning Agent can determine the complexity and sequence of tasks in a virtual laboratory depending on the student's previous results. If the system detects errors or difficulties, the agent can change the learning scenario, offer additional explanation, or form a new practical task. Thus, the immersive environment becomes not a separate technology but one of the possible interfaces for interaction with the multi-agent system. This integration requires the development of new interaction protocols and the adaptation of agents to the specific characteristics of immersive environments, including spatial reasoning, gesture recognition, and real-time feedback.

The development of learning analytics is also promising. The accumulation of information about course completion, task performance, use of recommendations, and interaction with educational resources allows forming a more accurate picture of the dynamics of the educational process. Analytical data can be used for further adaptation of recommendations, evaluation of the effectiveness of individual educational strategies, and identification of trends that are difficult to determine from the results of individual control measures. At the same time, the use of learning analytics must comply with the defined privacy principles. An increase in the amount of data in itself should not be considered a goal of system development. On the contrary, it is advisable to use only the information that has practical significance for a specific educational or managerial task, with the application of anonymization and access restriction mechanisms (*European Commission, 2026*). The integration of learning analytics with the multi-agent system also opens

opportunities for more sophisticated personalization, such as adaptive sequencing of learning activities, early identification of at-risk students, and optimization of the overall learning path *(Hao et al., 2026).*

A further stage in the development of the architecture may be a gradual transition from fully centralized orchestration to partially decentralized agent interaction. In the proposed model, the AI Core remains the central coordination component, which is appropriate in the initial stages of implementation due to the need to control request routing, data access, and decision coordination. However, as the number of agents increases, the centralized orchestrator may become an additional source of load. In the future, individual groups of agents may be able to interact directly, forming local coordination structures while still adhering to system-wide policies and constraints. This transition requires the development of new mechanisms for ensuring consistency, resolving conflicts, and maintaining security in a more distributed environment. The principles of multi-agent coordination, including role-based, centralized, peer-to-peer, and distributed interaction, provide a foundation for such evolution *(Arjona-Giner & Llorens-Largo, 2025; Chaturvedi & Gunawardena, 2026).*

A separate research direction may be the use of multi-agent reinforcement learning, which is also provided for in the structure of further system development *(Fedorenko et al., 2026).* With this approach, agents can gradually improve interaction strategies based on the results of previous actions. Potentially, this allows the system to adapt mechanisms of task distribution, resource management, or component coordination in accordance with changes in the real university environment. However, this direction requires particularly careful research. The ability of agents to independently change behavioral strategies complicates the prediction of their actions, so the implementation of such mechanisms must be accompanied by restrictions on autonomy, logging of decisions, and the possibility of human intervention. The use of reinforcement learning in educational contexts also raises ethical concerns regarding the optimization objectives and the potential

for unintended consequences, which must be addressed through robust governance frameworks *(Holmes et al., 2021; Tran et al., 2026).*

Scaling must be accompanied by continuous evaluation of effectiveness, security, pedagogical appropriateness, and user impact, maintaining commitment to privacy-by-design and human oversight *(Fedorenko et al., 2026).*

This section has presented a comprehensive roadmap for practical implementation, evaluation, and future development of the proposed architecture. The four-stage implementation strategy, hybrid integration infrastructure, combined quantitative-qualitative evaluation methodology, and identified future directions provide a structured pathway for transforming university education through multi-agent AI while maintaining the highest standards of security, privacy, and ethical responsibility.

Conclusion. This chapter has presented a comprehensive multi-agent AI architecture for university education transformation, extending the previously developed intelligent assistant model into a fully distributed multi-agent paradigm. The proposed system integrates four specialized agents—Personalized Learning, Resource Optimization, Security Monitoring, and Administrative Automation—orchestrated by a central AI Core that ensures system-wide coherence while preserving the autonomy of individual components. The analysis of existing international solutions confirmed that current systems remain limited to individual functional domains, lacking the comprehensive integration required for a truly intelligent university ecosystem.

The scientific contribution of this research lies in the development of a unified architectural framework that combines learning, resource management, security, and administrative functions within a single ecosystem, supported by a multi-layered privacy and ethics framework embedded directly into the architectural foundation. The proposed implementation roadmap and evaluation methodology provide a structured pathway for practical deployment, while the identified future perspectives—including adaptation to other educational levels,

integration with immersive technologies, and exploration of decentralized agent interaction—establish a foundation for continued research.

The practical significance of this work is twofold: for university administrators, it offers a structured approach to transforming fragmented information systems into an integrated intelligent environment; for researchers and developers, it provides a reference architecture adaptable to diverse educational contexts. The limitations of the study include its conceptual nature and the need for empirical validation, as well as the necessity of adapting the architecture to the specific infrastructure, organizational processes, and regulatory requirements of individual universities. Future research should focus on experimental verification of the proposed architecture, investigation of the long-term impact of AI agents on student learning, development of adaptive ethical control mechanisms, and further exploration of decentralized agent interaction models.

References:

Hao, Z., Cao, J., Li, R., Yu, J., Liu, Z., & Zhang, Y. (2026). Mapping student-AI interaction dynamics in multi-agent learning environments: Supporting personalized learning and reducing performance gaps. *Computers & Education*, 105472. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compedu.2025.105472

Yao, H., Xu, W., Turnau, J., Kellam, N., & Wei, H. (2026). Instructional Agents: Reducing Teaching Faculty Workload through Multi-Agent Instructional Design. In *Proceedings of the 19th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics (EACL 2026)* (pp. 4087–4109). Association for Computational Linguistics. DOI: https://doi.org/10.18653/v1/2026.eacl-long.191

Holmes, W., Porayska-Pomsta, K., Holstein, K., Sutherland, E., Baker, T., Buckingham Shum, S., Santos, O. C., Rodrigo, M. M. T., Cukurova, M., Bittencourt, I. I., & Koedinger, K. R. (2021). Ethics of AI in Education: Towards a Community-Wide Framework. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 32, 504–526. DOI: https://doi.org/10.1007/s40593-021-00239-1

Fedorenko, D., Zemlianko, H., Pevnev, V. (2026). Intelligent Assistant Model for University Educational Process. In: Lytvynov, O., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2025. ICTM 2025. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1918. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-22372-2_18

Kamalov, F., & Sulieman, H. (2026). From rule-based to goal-oriented: A systematic review of agentic AI in education. *IEEE Access*, 1. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2026.3704764

Arjona-Giner, S., & Llorens-Largo, F. (2025). Multiagent Systems for Educational Transformation: A Swarm of Intelligent Personal Assistants. In *Lecture Notes in Educational Technology* (Vol. Part F642, pp. 1332–1341). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-5658-5_132

Tran, V.-K., Dang, V.-K., & Nguyen, D.-H. (2026). SAGE: A Compositional Multi-Agent LLM Framework with Pedagogical Reasoning for Structured Collaborative Problem Solving. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 40(48). DOI: https://doi.org/10.1609/aaai.v40i48.42120

Chaturvedi, N., & Gunawardena, A. (2026). Agentic Orchestration for Adaptive Educational Recommendations: A Multi-Agent LLM Framework for Personalized Learning Pathways. In *Proceedings of the ACM Web Conference 2026*. DOI: https://doi.org/10.1145/3779211.3795741

European Commission. (2026). Ethical guidelines on the use of artificial intelligence (AI) and data in teaching and learning for educators. *Publications Office of the European Union*. URL: https://surl.li/shdpew

Nguyen, A., Ngo, H. N., Hong, Y., Dang, B., & Nguyen, B. T. (2023). Ethical principles for artificial intelligence in education. *Education and Information Technologies*, 28, 4221–4241. DOI: https://doi.org/10.1007/s10639-022-11316-w

NIST. (2024). Artificial Intelligence Risk Management Framework: Generative Artificial Intelligence Profile. *NIST AI 600-1*. DOI: https://doi.org/10.6028/NIST.AI.600-1

Zemlianko, H., & Pevnev, V. (2026). A Journey Through the Epochs of Digital Technologies: Interfaces – Classification and Evolution. FOP Brovin O.V., Kharkiv. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.21468107

Pevnev, V., Tsuranov, M., Zemlianko, H., Amelina, O. (2021). Conceptual Model of Information Security. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2020. ICTM 2020. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 188. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_14

UNESCO. (2024). Guidance for generative AI in education and research. UNESCO Publishing. DOI: https://doi.org/10.54675/PCSP7350

DOI 10.68346/978-617-95591-2-9-2026-1-605
UDC 376.015.31:373.5

CHAPTER 17.
CREATIVITY AS A RESOURCE FOR INCLUSIVE EDUCATION: INNOVATIVE TEACHING METHODS AND PRACTICES

Tetiana YAKOVYSHYNA
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor, Department of Primary,
Inclusive and Higher Education Pedagogy Rivne
State University of t Humanities
(Plastova str., 31, Rivne, 33000, Ukraine)
yakovyshynat@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9507-3621

Abstract. The chapter addresses the problem of ensuring genuine rather than formal participation of every learner under conditions of growing diversity in educational needs, learning pace and communicative capacities. The purpose is to substantiate the potential of creativity as a systemic resource of inclusiveness and to characterize the technologies of its development. Creativity is reinterpreted in the inclusive context as a mode of thinking, activity and interaction that enables the search for accessible pathways towards a shared educational goal. It is established that its leading manifestation is the teacher's creative potential – the ability to design adaptations of learning material in real time, to combine technologies and to create alternative channels of communication. It is argued that creativity acts as a mechanism of transition from adapting the learner to the existing system towards adapting the educational environment to learner diversity. Innovative technologies of creativity development are characterized – creative methods, gamification, quest technologies, art pedagogy, TRIZ, project-based and problem-based learning, design thinking, multisensory practices – and three criteria of their inclusiveness are defined: accessibility, variability of perceptual channels, and the absence of a normative benchmark for the outcome. It is proved that Universal Design for Learning constitutes the methodological basis for designing accessible creative tasks. The resources of digital and assistive technologies (interactive environments such as H5P, multimedia, augmentative and alternative communication) in overcoming cognitive and communicative barriers are revealed. AAC is shown to function not merely as a compensatory means but as a tool of the child's creative intent and initiative. The directions of adapting learning materials for students with special educational needs are systematized, with the conclusion that the effectiveness of technologies is determined not by their novelty but by the extent to which they remove barriers and expand each learner's agency.

Keywords: alternative and augmentative communication, art education, assistive technologies, inclusive education, educational barriers, special educational

needs, creativity, universal design for learning, digital adaptation of educational content.

ТВОРЧІСТЬ ЯК РЕСУРС ІНКЛЮЗИВНОЇ ОСВІТИ: ІННОВАЦІЙНІ ПЕДАГОГІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРАКТИКИ

Анотація. У розділі порушено проблему забезпечення реальної, а не формальної участі кожного здобувача освіти в освітньому процесі за умов зростання різноманітності учнівського контингенту за освітніми потребами, темпом навчання та комунікативними можливостями. Мета – обґрунтувати потенціал творчості як системного ресурсу інклюзивності й схарактеризувати технології її розвитку. Уточнено зміст поняття творчості в інклюзивному контексті: її витлумачено як спосіб мислення, діяльності та взаємодії, що забезпечує пошук доступних шляхів досягнення спільної освітньої мети. Установлено, що провідним її проявом є творчий потенціал педагога – здатність конструювати адаптації навчального матеріалу «тут і зараз», комбінувати технології та створювати альтернативні канали комунікації. Обґрунтовано, що творчість виступає механізмом переходу від адаптації здобувача до наявної системи до адаптації освітнього середовища під розмаїття учнів. Схарактеризовано інноваційні технології розвитку творчості – креативні методи, гейміфікацію, квест-технології, артпедагогіку, ТРВЗ, проєктне та проблемне навчання, дизайн-мислення, мультисенсорні практики – і визначено три критерії їх інклюзивності: доступність, варіативність каналів сприймання, безоцінність результату. Доведено, що методологічною основою проєктування доступних творчих завдань є універсальний дизайн навчання. Розкрито ресурси цифрових та асистивних технологій (інтерактивні середовища на кшталт H5P, мультимедіа, засоби альтернативної та додаткової комунікації) у подоланні когнітивних і комунікативних бар'єрів. Показано, що АДК доцільно розглядати не лише як компенсаторний засіб, а як інструмент творчого задуму та ініціативи дитини. Систематизовано напрями адаптації навчальних матеріалів для учнів з особливими освітніми потребами й зроблено висновок, що ефективність технологій визначається не їх новизною, а мірою усунення бар'єрів і розширення суб'єктності кожного учня.

Ключові слова: альтернативна та додаткова комунікація, артпедагогіка, асистивні технології, інклюзивна освіта, освітні бар'єри, особливі освітні потреби, творчість, універсальний дизайн навчання, цифрова адаптація навчального контенту.

Вступ. Утвердження інклюзивної освіти як норми, а не винятку, є однією з визначальних тенденцій розвитку української школи останніх десятиліть. Право на освіту для осіб з особливими освітніми потребами закріплено Законом України «Про освіту», Концепцією «Нова українська школа», а на

міжнародному рівні – Саламанкською декларацією та Конвенцією ООН про права осіб з інвалідністю. Кількість класів з інклюзивним навчанням в Україні щороку зростає, інклюзія реалізується на всіх рівнях освіти – від дошкільної до вищої. Водночас повномасштабна війна, вимушене переміщення родин, дистанційний і змішаний формати навчання, травматичний досвід дітей істотно розширили саме коло здобувачів освіти, які потребують додаткової підтримки, і зробили питання доступності освітнього процесу ще гострішим.

Проте наявність нормативних гарантій та організаційних умов сама по собі не забезпечує реальної участі дитини в освітньому процесі. Практика засвідчує суперечність між уніфікованою організацією навчання, орієнтованою на єдиний нормативний спосіб виконання завдання та єдиний спосіб демонстрації результату, і фактичною різноманітністю учнів за освітніми потребами, темпом навчання, способами сприймання інформації, комунікативними можливостями та індивідуальним досвідом. Ця суперечність породжує освітні бар’єри, які не завжди пов'язані зі складністю самого змісту: дитина може розуміти матеріал, але не мати доступного їй способу засвідчити це розуміння. Розв’язання окресленої суперечності потребує гнучких, варіативних педагогічних рішень, які не можуть бути повністю алгоритмізовані заздалегідь, оскільки жодна методика не покриває всієї варіативності потреб.

Саме тому в центрі нашої уваги перебуває творчість – не як естетичний або додатковий компонент навчання, а як методологічний і практичний ресурс забезпечення інклюзивності. Такий кут зору дає змогу переосмислити творчість одразу у двох площинах: як здатність педагога конструювати адаптації «тут і зараз», знаходити обхідні шляхи та проєктувати доступне середовище, і як атрибутивну властивість кожного здобувача освіти, способи вияву якої можуть істотно різнитися.

Теоретичним підґрунтям дослідження є праці з психології та педагогіки творчості: стратегіальна концепція творчої діяльності В. Моляко, дослідження педагогічної творчості С. Сисоєвої, доробок В. Рибалки, О. Кульчицької;

класичні студії Дж. Гілфорда (дивергентне мислення), Е. Торренса, К. Роджерса. Проблематику інклюзивного навчання та цифрової підтримки осіб з особливими освітніми потребами в українському контексті розробляли Л. Фамілярська, В. Пісняк, В. Звєкова, Н. Савінова, О. Боряк та інші. Водночас зарубіжні систематичні огляди останніх років *(M. Zluhan та ін., 2025; C. Navas-Bonilla та ін., 2025)* фіксують, що творчість в інклюзивних дослідженнях досі згадується здебільшого побіжно, як побічний результат педагогічних практик, а не як самостійний предмет аналізу. Це визначає наукову лакуну, на заповнення якої спрямовано цей розділ.

Мета – обґрунтувати потенціал творчості як системного ресурсу забезпечення інклюзивності освітнього процесу та схарактеризувати інноваційні педагогічні, цифрові й асистивні технології її розвитку в умовах інклюзивного навчання.

Досягнення мети передбачає розв’язання таких завдань:

1. Уточнити зміст поняття творчості в контексті інклюзивної освіти та визначити ключові змістові зміщення, яких воно зазнає порівняно з традиційним тлумаченням.

2. Розкрити сутність творчого потенціалу вчителя як професійного ресурсу подолання освітніх бар’єрів і схарактеризувати умови створення безпечного, прийнятного для всіх учнів освітнього середовища.

3. Схарактеризувати інноваційні педагогічні технології розвитку творчості в умовах інклюзивного навчання (креативні методи, гейміфікацію, квест-технології, артпедагогіку, проєктне та проблемне навчання, мультисенсорні практики) і визначити критерії їх інклюзивності.

4. Обґрунтувати роль універсального дизайну навчання (UDL) як методологічної основи проєктування доступних творчих завдань.

5. Розкрити можливості цифрових та асистивних технологій, зокрема інтерактивних середовищ і засобів альтернативної та додаткової комунікації, у розширенні творчих можливостей учнів.

6. Систематизувати напрями творчої адаптації навчальних матеріалів для учнів з особливими освітніми потребами.

Методи дослідження: аналіз і синтез наукових джерел, порівняння та узагальнення – для уточнення понятійного апарату; систематизація й класифікація – для впорядкування технологій розвитку творчості; моделювання – для розроблення напрямів адаптації творчих завдань.

1. Творчість як ресурс забезпечення інклюзивності освітнього процесу.

У науковій традиції творчість тлумачать щонайменше в чотирьох взаємопов'язаних площинах:

1) процес – специфічна діяльність зі створення суб'єктивно або об'єктивно нового;

2) продукт – результат, що має ознаки новизни, оригінальності та доцільності;

3) особистість – сукупність якостей (креативність, відкритість досвіду, гнучкість, толерантність до невизначеності);

4) середовище – умови, які уможливлюють або блокують творчий прояв *(Сисоєва С., 2024).*

Для інклюзивної освіти принципово важливе розрізнення творчості й креативності. Творчість частіше розуміють як діяльність, що завершується новим продуктом; креативність – як здатність особистості до породження нестандартних ідей, потенціал, який може реалізуватися, а може лишитися латентним. Дж. Гілфорд пов'язав її з дивергентним мисленням (побіжність, гнучкість, оригінальність, розробленість), Е. Торренс – із чутливістю до проблем і висуванням гіпотез, К. Роджерс – із самоактуалізацією особистості в умовах психологічної безпеки й свободи *(Navas-Bonilla, C. del R., Guerra-Arango, J. A., Oviedo-Guado, D. A., & Murillo-Noriega, D. E., 2025).*

В українській психолого-педагогічній науці цю проблематику розробляли В. Моляко (стратегіальна концепція творчої діяльності), С. Сисоєва

(педагогічна творчість), В. Рибалка, О. Кульчицька, Т. Яковишина та ін. *(Моляко В., Третяк Т., Ваганова Н.., & Шепельова М.,2020; Сисоєва С., 2024; Яковишина Т., 2026).*

Інклюзивна освіта виходить із того, що бар'єри створює не порушення розвитку дитини, а негнучке середовище. Відповідно творчість тут переосмислюється: вона перестає бути «додатковим», естетичним компонентом і стає методологічним інструментом усунення бар'єрів.

Виокремимо такі ключові змістові зміщення:

1) від результату – до процесу. Оцінюється не «якість» продукту за нормативним еталоном, а сам факт залучення, вибору, самовираження. Це знімає конкурентність, яка виштовхує дітей з особливими освітніми потребами;

2) від елітарності – до універсальності. Творчість розглядається не як обдарованість меншості, а як атрибутивна властивість кожної людини (гуманістична парадигма). Це узгоджується з принципом презумпції компетентності дитини;

3) від нормативності – до варіативності. Творче завдання за визначенням не має єдиної правильної відповіді, отже – не має й єдиного «правильного» способу виконання. Дитина з порушенням мовлення, зору, інтелектуального розвитку може відповісти рухом, звуком, зображенням, символом – і це буде валідною відповіддю, а не «спрощеною» *(Navas-Bonilla, C. del R., Guerra-Arango, J. A., Oviedo-Guado, D. A., & Murillo-Noriega, D. E., 2025).*

У контексті інклюзивної освіти творчість доцільно розглядати не лише як здатність створювати нові, оригінальні продукти, а як спосіб мислення, діяльності та взаємодії, що забезпечує пошук нестандартних рішень освітніх завдань відповідно до індивідуальних потреб і можливостей кожного здобувача освіти. Такий підхід особливо важливий в інклюзивному освітньому середовищі, де педагог стикається з різноманітністю навчальних можливостей, способів сприймання інформації, темпів навчання, комунікативних потреб та індивідуального досвіду учнів. Відтак творчість педагога виявляється у

здатності гнучко змінювати зміст, форми, методи й засоби навчання, створюючи умови для активної участі кожної дитини.

Інклюзивна освіта актуалізує розуміння творчості як ресурсу подолання освітніх бар'єрів. Якщо традиційна організація навчання часто передбачає адаптацію учня до вже визначених способів роботи, то творчий підхід передбачає пошук таких способів організації освітнього процесу, які дають змогу самому учневі проявити свої сильні сторони. Наприклад, одна й та сама навчальна мета може досягатися через малювання, моделювання, гру, рухову активність, усну або альтернативну комунікацію, цифровий продукт чи виконання практичного завдання. Таким чином, творчість сприяє переходу від уніфікованої моделі навчання до варіативного й особистісно орієнтованого освітнього процесу.

Водночас творчість в інклюзивній освіті не обмежується діяльністю педагога. Вона є важливою характеристикою самого учня, незалежно від наявності чи відсутності особливих освітніх потреб. Кожна дитина має потенціал до творчого самовираження, однак способи його виявлення можуть істотно відрізнятися. Для одних учнів творчість проявляється у вербальному продукуванні ідей, для інших – у візуальній діяльності, конструюванні, музиці, русі, виборі символів або використанні засобів альтернативної та додаткової комунікації. Тому завдання інклюзивної освіти полягає не у вимозі відповідати єдиному зразку творчої діяльності, а у створенні різноманітних можливостей для самовираження, вибору, експериментування та продукування власних ідей *(Фамілярська Л., 2023).*

Отже, творчість у контексті інклюзивної освіти можна визначити як здатність педагога й здобувача освіти генерувати, адаптувати та реалізовувати нові способи діяльності, комунікації й розв'язання освітніх завдань з урахуванням індивідуальних можливостей і потреб кожного учасника освітнього процесу. У такому розумінні творчість виступає не додатковим компонентом інклюзивного навчання, а одним із його важливих ресурсів, що

забезпечує гнучкість, доступність, активну участь і суб'єктність здобувачів освіти.

Творчий потенціал учителя в умовах інклюзивної освіти є важливим ресурсом забезпечення доступності та результативності освітнього процесу. Його сутність полягає не лише у здатності педагога продукувати нові ідеї, а й у готовності нестандартно реагувати на освітні потреби учнів, адаптувати традиційні способи навчання та створювати нові педагогічні рішення. Інклюзивне освітнє середовище характеризується різноманітністю учнів, що зумовлює необхідність відмови від універсального підходу до організації навчання. Відповідно, учитель має володіти здатністю бачити декілька можливих шляхів досягнення однієї навчальної мети та обирати або конструювати той, який найбільше відповідає можливостям конкретного учня.

Таким чином визначаємо педагогічну творчість, насамперед, як здатність конструювати адаптації та модифікації навчального матеріалу «тут і зараз», перебудовувати завдання під конкретну дитину, знаходити обхідні шляхи. Фактично інклюзивне навчання неможливе без творчого мислення вчителя, бо жодна методика не покриває всієї варіативності потреб.

Творчість дитини. Артпедагогіка, музико-, драма-, казкотерапія, зображувальна діяльність, конструювання – як повноправні складові освітнього маршруту, а не дозвілля.

Творчість освітнього середовища. Гнучке предметно-просторове й соціальне середовище, що допускає нестандартні формати участі; співтворчість команди психолого-педагогічного супроводу, асистента вчителя, батьків.

Важливою складовою творчого потенціалу педагога є гнучкість педагогічного мислення. Учитель, який працює в інклюзивному класі, має бути готовим змінювати завдання, способи представлення інформації, темп роботи, форми взаємодії та критерії демонстрації результату відповідно до ситуації. Наприклад, якщо учень відчуває труднощі з виконанням письмового завдання, педагог може запропонувати йому усну відповідь, схематичне зображення,

створення цифрового продукту, використання піктограм або іншого доступного способу комунікації. У такому випадку творчість учителя проявляється не в ускладненні навчального матеріалу, а у пошуку альтернативного шляху до тієї самої освітньої мети *(Гордійчук О., 2026).*

Особливого значення творчий потенціал педагога набуває у процесі подолання освітніх бар'єрів. Бар'єри можуть бути пов'язані зі змістом навчання, способом подання інформації, комунікацією, організацією простору, соціальною взаємодією або недостатньою мотивацією учня. Творчий учитель не сприймає такі труднощі як незмінні обмеження, а розглядає їх як педагогічну проблему, що потребує пошуку нового рішення. Саме тому творчість стає механізмом перетворення бар'єрів на можливості для педагогічної адаптації та розвитку.

У цьому контексті важливим є використання мультимодальних способів навчання, які передбачають поєднання різних каналів сприймання та способів вираження результату діяльності. Візуальні матеріали, предметні моделі, рух, музика, гра, цифрові технології, інтерактивні вправи та засоби альтернативної й додаткової комунікації розширюють можливості учня бути активним учасником освітнього процесу. Творчий педагог при цьому не просто використовує наявні технології, а комбінує, адаптує та трансформує їх відповідно до конкретної освітньої ситуації.

Творчий потенціал учителя також пов'язаний із його здатністю створювати емоційно безпечне середовище, у якому учень має право на помилку, власний спосіб виконання завдання та вибір. Для інклюзивної освіти це принципово важливо, оскільки постійне порівняння з єдиним нормативним зразком може знижувати мотивацію та впевненість учнів, які мають різні освітні можливості. Натомість творчий підхід дає змогу змістити акцент із відповідності єдиному результату на індивідуальний прогрес, самовираження та активну участь (*Яковишина Т., 2026).*

Отже, творчий потенціал учителя можна розглядати як професійний ресурс, що забезпечує гнучкість, варіативність та індивідуалізацію інклюзивного освітнього процесу. Здатність педагога генерувати нові ідеї, адаптувати навчальний контент, комбінувати педагогічні технології та знаходити альтернативні способи комунікації сприяє зменшенню освітніх бар'єрів і розширенню можливостей кожного учня. У цьому аспекті творчий учитель постає не лише транслятором готових знань, а проєктувальником доступного освітнього середовища, здатним конструювати різні шляхи до спільної навчальної мети.

Щодо створення безпечного й прийнятного для всіх учнів освітнього середовища як прояв творчого підходу, то зазначимо, що інклюзивне освітнє середовище передбачає створення таких умов, у яких кожен учень, незалежно від індивідуальних особливостей, освітніх потреб, способів сприймання інформації чи темпу навчання, може відчувати себе прийнятим, психологічно захищеним і повноцінним учасником освітнього процесу. У цьому контексті творчість педагога виступає важливим ресурсом проєктування середовища, здатного враховувати різноманітність учнів. Йдеться не лише про використання цікавих методів чи нестандартних завдань, а про принципово інший спосіб педагогічного мислення – готовність бачити в різноманітності не проблему, а джерело нових можливостей для організації навчання та взаємодії.

Безпечне освітнє середовище має забезпечувати не тільки фізичну доступність, а й емоційний та соціальний комфорт учнів. Творчий підхід учителя може проявлятися у створенні різних способів залучення дитини до спільної діяльності, наданні можливості вибору, використанні ігрових та мистецьких практик, організації роботи в парах і малих групах, застосуванні візуальних опор та альтернативних способів комунікації *(Донець В., 2021).* Наприклад, учень може обрати спосіб представлення результату – усну відповідь, малюнок, схему, рухову демонстрацію, цифрову презентацію або піктограми. Така варіативність зменшує тиск єдиного стандарту виконання

завдання та створює умови, за яких кожен учень може продемонструвати свої сильні сторони.

Важливим компонентом прийнятного для всіх середовища є право учня на помилку та індивідуальний темп діяльності. У творчому освітньому процесі помилка не розглядається виключно як показник недостатнього засвоєння матеріалу. Вона може бути природним етапом пошуку, експериментування та формування власного способу розв'язання проблеми. Такий підхід сприяє формуванню атмосфери довіри, у якій учні не бояться висловлювати припущення, ставити запитання та пропонувати нестандартні рішення. Особливо важливо це для дітей, які через попередній негативний навчальний досвід можуть уникати активної участі або боятися публічної демонстрації своїх можливостей.

Творчість педагога також може бути спрямована на формування культури взаємної поваги та прийняття відмінностей. Для цього доцільно використовувати спільні творчі проєкти, ситуації співпраці, рольові та кооперативні ігри, мистецькі завдання, у яких внесок кожного учасника має значення для спільного результату. Важливо, щоб учитель не акцентував увагу на відмінностях учня як на його «проблемі», а створював ситуації, у яких різні способи мислення, спілкування та діяльності стають природною частиною колективної роботи.

Особливу роль у цьому процесі відіграє творче проєктування освітнього простору. Розміщення навчальних матеріалів, організація зон для індивідуальної та групової роботи, використання візуальних навігаторів, символів, піктограм, кольорових маркерів та інших засобів доступності можуть одночасно виконувати функціональну й мотиваційну роль. Наприклад, зрозуміла візуальна структура класу допомагає учням самостійно орієнтуватися в послідовності діяльності, а можливість вибору місця, способу роботи чи навчального ресурсу посилює відчуття контролю та автономності.

Таким чином, творчість як ресурс забезпечення інклюзивності полягає у здатності педагога створювати різноманітні, гнучкі та доступні умови для участі кожного учня. Безпечне освітнє середовище формується не окремим методом чи технологією, а сукупністю щоденних педагогічних рішень, у яких враховуються індивідуальні особливості дітей, підтримується їхня автономність, визнається право на помилку та забезпечується можливість самовираження. Саме тому творчий підхід може розглядатися як один із механізмів переходу від «пристосування учня до системи» до «пристосування освітнього середовища до різноманітності учнів» (*Яковишина Т., 2026).*

Отже, проведений аналіз дає підстави розглядати творчість як важливий ресурс забезпечення інклюзивності освітнього процесу. В умовах різноманітності учнів за освітніми потребами, можливостями, темпом навчання, способами сприймання та комунікації традиційна уніфікована організація навчання потребує доповнення гнучкими та варіативними педагогічними рішеннями. Творчість у цьому контексті набуває значення не лише як здатність до створення нового, а як спосіб педагогічного мислення, що передбачає пошук доступних, індивідуалізованих і нестандартних шляхів досягнення спільних освітніх цілей.

Встановлено, що важливим проявом творчості в інклюзивній освіті є творчий потенціал учителя, який охоплює здатність генерувати педагогічні ідеї, гнучко реагувати на освітні потреби учнів, адаптувати зміст і форми навчання, комбінувати різні технології та створювати альтернативні способи діяльності й комунікації. Творчий педагог не обмежується використанням готових методик, а здатний трансформувати їх відповідно до конкретної освітньої ситуації. Саме така професійна гнучкість створює передумови для подолання освітніх бар’єрів і розширення можливостей участі кожного учня в навчальній діяльності.

Обґрунтовано, що творчість може виступати механізмом переходу від адаптації учня до існуючої системи до адаптації освітнього середовища до різноманітності учнів. Такий підхід передбачає варіативність способів подання

інформації, виконання завдань і демонстрації результатів, використання візуальних, вербальних, практичних, мистецьких та цифрових засобів, а також створення альтернативних каналів комунікації. У результаті зменшується залежність успішності учня від його здатності відповідати єдиному нормативному способу виконання навчального завдання.

Важливим результатом творчого проєктування інклюзивного освітнього процесу є формування безпечного, психологічно комфортного та прийнятного для всіх учнів середовища. Його характерними ознаками є атмосфера довіри, право на помилку, можливість вибору, підтримка індивідуального темпу діяльності, визнання різноманітності та забезпечення умов для самовираження. Творчі методи, кооперативні форми роботи, мистецькі практики, ігрові ситуації та різноманітні способи комунікації можуть створювати умови, за яких відмінності між учнями не стають підставою для їх виключення з активної діяльності (*Яковишина Т., 2026)*.

Таким чином, творчість доцільно розглядати як системний ресурс інклюзивної освіти, який охоплює діяльність педагога, організацію освітнього середовища, способи взаємодії та можливості самореалізації учнів. Її потенціал полягає у забезпеченні гнучкості освітнього процесу, подоланні бар'єрів, підтримці суб'єктності здобувачів освіти та створенні різних шляхів досягнення навчальних результатів.

2. Інноваційні педагогічні технології розвитку творчості в умовах інклюзивного навчання.

Інноваційна педагогічна технологія в інклюзивному класі має відповідати трьом взаємопов'язаним критеріям:

1) доступність – кожен учасник може долучитися на посильному для себе рівні без «спрощеної версії для окремих дітей»;

2) варіативність каналів – зміст подається і відтворюється через різні модальності (зорову, слухову, тактильно-кінестетичну, рухову);

3) безоцінність результату – відсутність єдиної правильної відповіді та нормативного еталона продукту *(Фамілярська Л., 2023).*

Методологічною основою створення доступних творчих завдань може виступати Universal Design for Learning (UDL) – універсальний дизайн навчання. Його застосування передбачає проєктування освітнього процесу з урахуванням різноманітності учнів ще на етапі планування, а не лише подальше пристосування готового завдання до окремої дитини. У контексті розвитку творчості особливо важливими є варіативність способів залучення учнів до діяльності, представлення навчальної інформації та демонстрації результату. Наприклад, творче завдання «Створи продовження історії» може передбачати написання тексту, створення коміксу, аудіозапис, серію малюнків, відео або послідовність піктограм. Єдина навчальна мета при цьому зберігається, але шлях до її досягнення може бути різним.

Таким чином, сучасна інклюзивна освіта потребує таких педагогічних технологій, які не лише забезпечують доступ учнів до навчального змісту, а й створюють умови для активної участі, самовираження, генерування ідей та творчого розв'язання проблем. У цьому контексті інноваційні педагогічні технології доцільно розглядати як засоби трансформації освітнього процесу відповідно до різноманітних потреб здобувачів освіти. Їхня цінність полягає у можливості створити ситуацію, в якій кожен учень може не тільки засвоювати готову інформацію, а й діяти, експериментувати, робити вибір, висувати припущення та створювати власний освітній продукт.

Особливого значення набувають креативні методи навчання, які передбачають відхід від репродуктивного відтворення інформації та стимулюють учнів до пошуку власних способів виконання завдання. До таких методів можна віднести мозковий штурм, метод асоціацій, альтернативні запитання, рольове моделювання, сторітелінг, творчі майстерні, метод незавершеної ситуації, створення ментальних карт, візуальне мислення та інші прийоми. В умовах інклюзивного навчання принципово важливо, щоб такі

методи мали варіативні способи виконання та представлення результату. Учень може висловити ідею усно, письмово, за допомогою малюнка, схеми, предметної моделі, піктограм, жестів або цифрових засобів. Таким чином, творчість перестає залежати від володіння одним визначеним способом діяльності *(Шевчук О., & Семенишена Р., 2024).*

Однією з перспективних технологій є ***гейміфікація***, яка передбачає використання елементів ігрової діяльності в неігровому освітньому контексті. Ігрові механіки – завдання, рівні складності, бали, винагороди, вибір, змагання із самим собою або командна взаємодія – можуть підвищувати мотивацію учнів та стимулювати їхню активність. Для інклюзивного освітнього середовища особливо цінною є можливість адаптувати складність, темп і спосіб виконання ігрового завдання. Наприклад, одна навчальна мета може реалізовуватися через різні рівні завдань, а учень може самостійно обирати спосіб проходження певного етапу. У такому разі гейміфікація виконує не лише мотиваційну, а й диференційну та інклюзивну функцію *(Харківська А., 2024).*

Близькою за своєю логікою є ***квест-технологія***, яка організовує навчальну діяльність як послідовність проблемних або творчих завдань, об'єднаних спільною метою та певним сюжетом. Квест створює ситуацію навчального пошуку, у якій учень стає активним учасником, а не пасивним споживачем інформації. В інклюзивному навчанні квест може бути побудований таким чином, щоб різні учасники виконували різні ролі відповідно до своїх можливостей: знаходили інформацію, працювали з візуальними матеріалами, розв’язували логічні завдання, створювали власний продукт або здійснювали вибір між альтернативами. Це дає змогу організувати спільну діяльність без вимоги однакового способу участі.

Значний потенціал для розвитку творчості мають проєктне та ***проблемне навчання***. Проєктна технологія створює умови для самостійного визначення завдань, планування діяльності, пошуку інформації, прийняття рішень і створення конкретного продукту. Водночас проблемне навчання стимулює

учнів до пошуку відповідей на запитання, які не мають очевидного або єдиного способу розв'язання. Для учнів з різними освітніми потребами важливо забезпечити можливість виконувати спільний проєкт на різних рівнях складності та в різних формах. Наприклад, у межах одного проєкту один учень може збирати інформацію, інший – створювати ілюстрації, третій – працювати з цифровими інструментами, четвертий – презентувати результат за допомогою доступного йому способу комунікації. Така організація діяльності дозволяє перетворити індивідуальні відмінності на ресурс командної творчості *(Савінова Н., & Нездатна А., 2023).*

Зупинимось детальніше на ***артпедагогічних технологіях***, адже ця група, у якій мистецька діяльність виконує не естетичну, а розвивальну й корекційну функцію – найширша.

Ізотерапія та зображувальні техніки. Малювання пальцями, монотипія, ниткографія, кляксографія, малювання на манці чи піску, техніка «каракулі» з подальшим домальовуванням. Цінність – низький «поріг входу»: дитина з порушенням дрібної моторики або інтелектуального розвитку отримує виразний результат без вимоги технічної вправності.

Музикотерапія й елементарне музикування (система К. Орфа). Робота з шумовими та ударними інструментами, боді-персекшн (звучні жести), ритмічна імпровізація. Ритм є універсальним організатором діяльності: він синхронізує групу, не потребує мовлення й доступний дітям з порушеннями слуху через вібраційне та зорове сприймання.

Драматизація й театральна педагогіка. Тіньовий театр, театр ляльок-рукавичок, пантоміма, застільні читання за ролями. Розподіл ролей дає змогу забезпечити кожному посильну міру участі: від головної ролі до «звукорежисера», що подає один сигнал у потрібний момент.

Казкотерапія та сторітелінг. Складання й програвання історій, «карти казки», цифровий сторітелінг. Технологія природно поєднує мовленнєвий,

емоційний і соціальний розвиток; для дітей із мовленнєвими порушеннями застосовують піктограмні та символьні опори.

Бібліо-, лялько-, танцювально-рухова терапія, робота з піском (sand-art), глиною, тістом – як окремі напрями сенсорно насиченої творчої діяльності *(Діомідова Н., Марєєва Т., & Мінько Н., 2021).*

ТРВЗ-педагогіка (теорія розв'язання винахідницьких задач). Методи фокальних об'єктів, «морфологічна скринька», «добре – погано», системний оператор, прийом «навпаки» *(Звєкова В., 2023).* Формує дивергентне мислення; завдання відкритого типу знімають страх помилки, що особливо значуще для дітей з тривожністю та зниженою навчальною мотивацією.

Метод проєктів. Дає змогу розподілити ролі за принципом сильних сторін: хтось фотографує, хтось добирає матеріал, хтось презентує, хтось відповідає за оформлення. Кожен робить реальний внесок у спільний продукт – це найпотужніший механізм соціальної інклюзії.

Дизайн-мислення (Design Thinking). П'ять етапів (емпатія – фокусування – генерація ідей – прототип – тестування) у спрощеному, адаптованому для школярів варіанті. Етап емпатії має додаткову цінність: діти вчаться проєктувати рішення для потреб інших, зокрема однокласників *(Помирча С., & Семіряжко А., 2023).*

Цифрові та асистивні технології творчості. Цифровізація освіти відкриває нові можливості для розвитку творчого потенціалу учнів з різними освітніми потребами. Цифрові технології дають змогу не лише урізноманітнити способи подання навчального матеріалу, а й розширити можливості учня щодо створення власного освітнього продукту. Інтерактивні презентації, цифрове малювання, відеоредактори, онлайн-дошки, конструктори коміксів, інтерактивні вправи, квести та мультимедійні середовища створюють умови для експериментування, вибору та самовираження. Важливою перевагою цифрового середовища є можливість поєднання тексту, зображення, звуку, анімації та відео, що дозволяє учням обирати найбільш доступний для них

спосіб сприймання інформації та представлення результату творчої діяльності *(Шевчук О., & Семенишена Р., 2024).*

В інклюзивному освітньому процесі особливого значення набувають асистивні технології, які розширюють функціональні можливості учнів і сприяють їхній активній участі у навчанні. До них належать технічні та цифрові засоби, що допомагають компенсувати або зменшити вплив певних функціональних обмежень: альтернативні клавіатури й миші, перемикачі, екранні читачі, засоби збільшення, програми розпізнавання мовлення, комунікатори та системи альтернативної й додаткової комунікації (АДК). Їхнє значення для розвитку творчості полягає в тому, що технологія дозволяє учневі не лише отримувати інформацію, а й створювати та презентувати власні ідеї *(Боряк О., & Косенко Ю., 2021).*

Особливе місце посідають засоби альтернативної та додаткової комунікації, які можуть стати інструментом творчого самовираження учнів із комплексними комунікативними потребами. Використовуючи піктограми, символи, комунікативні картки, комунікатори або спеціалізовані цифрові пристрої, учень може створювати повідомлення, відповідати на запитання, розповідати історії, описувати власні емоції, брати участь у грі та спільних творчих проєктах. Отже, АДК варто розглядати не лише як засіб забезпечення базової комунікації, а і як інструмент розвитку уяви, ініціативності та творчої активності *(Гнізділова О., Дубовик Ю., & Бурсова С., 2026).*

Потужним напрямом є використання інтерактивних цифрових технологій для створення адаптованих творчих завдань. Наприклад, за допомогою H5P педагог може створювати інтерактивні презентації, завдання на встановлення відповідностей, сортування, перетягування об’єктів, інтерактивні відео та інші види навчальної активності. Важливо, що такі ресурси можуть бути адаптовані за кількістю інформації, складністю інструкцій, способом взаємодії та рівнем візуальної підтримки. Це дозволяє перетворити традиційне репродуктивне завдання на інтерактивну творчу діяльність, у якій учень здійснює вибір,

експериментує та отримує безпосередній зворотний зв'язок *(Jacob, T., & Centofanti, S., 2024).*

Цифрові та асистивні технології також сприяють персоналізації творчої діяльності. Один і той самий результат може бути представлений різними способами: текстом, малюнком, фотографією, аудіозаписом, відео, презентацією, коміксом, анімацією або за допомогою символів АДК. Наприклад, завдання «Розкажи про свого улюбленого героя» може передбачати написання невеликого тексту, створення малюнка, запис аудіоповідомлення, складання коміксу або побудову повідомлення за допомогою піктограм. У такій організації навчання форма творчого продукту не обмежує можливості учня, а навпаки – дозволяє йому продемонструвати індивідуальний спосіб мислення та самовираження.

Водночас використання цифрових і асистивних технологій саме по собі не гарантує інклюзивності та розвитку творчості. Визначальним є педагогічний дизайн, тобто спосіб, у який учитель добирає технологію, визначає її функцію та інтегрує її в освітню діяльність. Надмірна кількість цифрових елементів, складна навігація, перевантаження інтерфейсу або необхідність виконувати завдання лише одним способом можуть, навпаки, створювати нові бар'єри. Тому технологія має добиратися не за принципом її новизни, а відповідно до запитання: «Яку можливість для участі та творчого самовираження вона відкриває конкретному учневі?» *(Шевчук О., & Семенишена Р., 2024).*

Особливу роль у цьому процесі відіграє цифрова доступність. Доступний цифровий ресурс повинен передбачати зрозумілу навігацію, достатній розмір і контрастність елементів, чіткі інструкції, альтернативні способи взаємодії та можливість використання допоміжних технологій. Для учнів із різними освітніми потребами доцільно передбачати різний рівень підтримки: візуальні підказки, піктограми, аудіосупровід, покрокові інструкції, можливість повторного виконання завдання або вибору способу відповіді. Таким чином, доступність стає передумовою творчості, оскільки учень спочатку має

отримати реальну можливість діяти, щоб мати змогу створювати *(Пісняк В., 2023).*

Наведемо приклад застосування цифрових та асистивних технологій творчості у таблиці 1.

Таблиця 1.

Застосування цифрових та асистивних технологій творчості

Група	**Приклади застосування**
Цифрове мистецтво	Графічні редактори з великими інструментами, малювання стилусом на планшеті
Аудіо-візуальна творчість	Створення буктрейлерів, подкастів, аудіоказок, анімації (stop-motion)
Доповнена та віртуальна реальність	Віртуальні екскурсії, 3D-моделювання простих об'єктів
Асистивні інструменти	Синтез мовлення й голосове введення, екранні клавіатури, eye-tracking, кнопки-перемикачі, AAC-додатки з піктограмами
Хмарні сервіси співтворчості	Спільні дошки, інтерактивні плакати, онлайн-колажі

Принципово, що асистивні технології тут не «полегшують життя», а вирівнюють стартові умови для творчого акту: дитина з тяжкими порушеннями моторики може створити мультфільм, керуючи програмою поглядом.

Отже, цифрові та асистивні технології можуть розглядатися як інструменти розширення творчих можливостей учнів в інклюзивному освітньому середовищі. Їхній потенціал полягає не стільки в технологічній новизні, скільки у здатності забезпечувати доступ до інформації, альтернативні способи комунікації, вибір форм діяльності, персоналізацію навчання та можливість створення власного продукту. Ефективне поєднання цифрових, асистивних і педагогічних технологій сприяє переходу від моделі, у якій учень

є переважно споживачем готового навчального контенту, до моделі, у якій він стає активним творцем, комунікатором і суб'єктом власної освітньої діяльності.

Потенційнозначущим розглядаємо мультисенсорне навчання (одночасне залучення кількох аналізаторів), сенсорну інтеграцію, роботу в сенсорній кімнаті, snoezelen-терапію. Творча діяльність із матеріалами, водою, світлом, тканинами різної фактури забезпечує саморегуляцію та готовність до навчальної взаємодії – без цього етапу творчі завдання для частини дітей просто недоступні *(Пісняк В., 2023)*.

Розвиток дитячої творчості неможливий без відповідних форматів роботи дорослих:

1) командний підхід (спільне планування вчителя, асистента вчителя, психолога, логопеда, батьків) як форма професійної співтворчості;

2) ко-тічинг (спільне викладання) у моделях «один навчає – один спостерігає», «паралельне навчання», «станційне навчання», «командне викладання»;

3) індивідуальна програма розвитку з творчим компонентом як обов'язковою, а не факультативною складовою;

4) портфоліо й описове оцінювання як інструменти фіксації творчого поступу без нормативного порівняння *(Донець В., 2021).*

Ефективність описаних технологій забезпечується сукупністю чинників:

1) психологічна безпека середовища (право на помилку, відсутність висміювання);

2) надання дитині реального вибору – теми, матеріалу, форми, темпу, партнера;

3) попереднє структурування завдання (візуальний план, зразок, покрокова інструкція) – свобода не тотожна відсутності опор;

4) дозування сенсорного навантаження та передбачені «тихі зони»;

5) акцент на процесі й зусиллі у зворотному зв'язку;

6) готовність педагога до імпровізації та відмови від наперед заданого сценарію уроку *(Донець В., 2021).*

Окремої уваги потребує адаптація творчих завдань відповідно до можливостей і потреб учнів. Адаптація не повинна означати автоматичне спрощення змісту або зниження очікуваних результатів. Її доцільно розуміти як зміну умов, способу виконання, обсягу, темпу, рівня підтримки чи форми представлення результату за умови збереження сутності навчальної мети. Наприклад, завдання «Створи рекламу улюбленої книги» може бути реалізоване у вигляді письмового тексту, малюнка, колажу, аудіоповідомлення, презентації або набору символів. Така варіативність дозволяє учням проявляти творчість через доступний для них канал діяльності (*Яковишина Т., 2026).*

Важливо, що адаптація творчого завдання має здійснюватися не за принципом «зробити легше», а за принципом «зробити доступним для творчої дії». Для цього педагог може змінювати кількість етапів завдання, використовувати візуальні інструкції, зразки й алгоритми, надавати вибір матеріалів, передбачати додатковий час, використовувати цифрові інструменти або засоби альтернативної та додаткової комунікації. Водночас надмірна кількість підказок не повинна позбавляти учня можливості самостійно приймати рішення. Саме баланс між педагогічною підтримкою та свободою вибору створює умови для справжньої творчої діяльності *(Звєкова В., 2023).*

Таким чином, інноваційні педагогічні технології в умовах інклюзивного навчання мають розглядатися не лише як засоби урізноманітнення освітнього процесу, а як інструменти розширення творчих можливостей кожного учня. Гейміфікація та квест-технології забезпечують мотиваційне й діяльнісне занурення, проєктне та проблемне навчання створюють простір для самостійного пошуку й прийняття рішень, а принципи UDL забезпечують доступність різних способів участі та самовираження. Їх поєднання з продуманою адаптацією завдань дає можливість перейти від моделі, у якій усі

учні виконують однакову діяльність однаковим способом, до гнучкої моделі, де спільна освітня мета досягається різними творчими шляхами.

Отже, інноваційні технології розвитку творчості в інклюзивному навчанні утворюють цілісну систему, у якій артпедагогічні, проблемно-пошукові, ігрові, цифрові та сенсорно орієнтовані підходи взаємодоповнюються. Їхня спільна ознака – множинність легітимних способів участі, що перетворює гетерогенність класу з методичної проблеми на дидактичний ресурс. Творчі технології фактично реалізують ключову ідею інклюзії: змінювати належить не дитину під освітній процес, а освітній процес – під розмаїття дітей.

3. Цифрові інструменти та творчі практики подолання освітніх бар'єрів.

В умовах інклюзивної освіти цифрові технології набувають особливого значення як інструмент подолання освітніх бар'єрів та розширення можливостей учнів для активної участі в освітньому процесі. Традиційно навчальний контент часто подається в єдиній формі, що передбачає однаковий спосіб сприймання, опрацювання та відтворення інформації всіма здобувачами освіти. Проте індивідуальні особливості учнів зумовлюють необхідність пошуку альтернативних способів представлення матеріалу. Саме тому цифрова адаптація навчального контенту передбачає не лише переведення друкованого матеріалу в електронний формат, а його творче переосмислення відповідно до різних способів сприймання, комунікації, взаємодії та демонстрації результатів навчання *(Пісняк В., 2023).*

Цифрова адаптація може охоплювати зміну структури, обсягу, складності та способу представлення навчального матеріалу. Наприклад, великий текст може бути трансформований у короткі інформаційні блоки, схему, інфографіку, інтерактивну презентацію або відеопояснення; складну інструкцію можна подати у вигляді послідовності простих кроків, доповнених піктограмами чи візуальними підказками. Для учнів, яким складно сприймати значні обсяги текстової інформації, доцільним є поєднання тексту із зображеннями, аудіо,

відео та анімацією. Водночас цифрове середовище дає можливість змінювати розмір шрифту, темп подання інформації, кількість завдань, рівень підказок та спосіб виконання діяльності. Таким чином, один навчальний зміст може бути представлений у декількох доступних формах без зміни основної освітньої мети *(Фамілярська Л., 2023).*

Важливою характеристикою цифрової адаптації є варіативність способів взаємодії з навчальним матеріалом. Учень може не лише прочитати інформацію, а й прослухати її, переглянути відео, розглянути візуальну модель, виконати інтерактивну вправу, створити власний цифровий продукт або продемонструвати результат за допомогою доступного для нього способу комунікації. Такий підхід відповідає логіці універсального дизайну навчання, відповідно до якої одна освітня мета може досягатися різними шляхами. Отже, цифрова адаптація не повинна зводитися до спрощення завдань для окремих учнів. Її сутність полягає у створенні доступних умов для досягнення спільної мети різними способами.

Особливого значення набувають інтерактивні цифрові інструменти, які дають змогу перетворити пасивне сприймання інформації на активну діяльність *(Фамілярська Л., 2023)*. Інтерактивні презентації, тести, вправи на встановлення відповідностей, сортування, перетягування об’єктів, інтерактивне відео, цифрові квести та навчальні ігри створюють можливості для поетапного засвоєння матеріалу й оперативного отримання зворотного зв’язку. Зокрема, середовище H5P дає змогу творчо трансформувати традиційний навчальний матеріал у систему інтерактивних завдань, у яких учень не лише читає або переглядає інформацію, а активно взаємодіє з нею *(Jacob T., & Centofanti S., 2024).* Наприклад, текст параграфа може бути перетворений на інтерактивну презентацію з вбудованими запитаннями, відеоматеріал – на інтерактивне відео з контрольними запитаннями, а теоретичні положення – на вправи з класифікації, встановлення відповідностей чи визначення правильного рішення.

Творчий потенціал цифрових технологій особливо виразно проявляється тоді, коли учень переходить від споживання готового контенту до його створення. Цифрові дошки, редактори презентацій, графічні редактори, конструктори коміксів, відеоредактори та інші інструменти дозволяють створювати власні історії, схеми, малюнки, відео, презентації, комікси або мультимедійні проєкти. При цьому форма творчого продукту може відповідати індивідуальним можливостям учня. Один здобувач освіти може представити результат у текстовій формі, інший – у вигляді малюнка чи схеми, третій – через аудіозапис або відео, а учень, який використовує альтернативну та додаткову комунікацію (АДК), – за допомогою символів, піктограм чи комунікатора. Така варіативність сприяє не лише доступності навчання, а й визнанню різних форм творчого самовираження.

Цифрові технології можуть бути ефективним засобом подолання не лише когнітивних, а й комунікативних бар'єрів. Засоби альтернативної та додаткової комунікації, синтезатори мовлення, комунікативні застосунки, візуальні розклади та системи символів забезпечують можливість учням висловлювати думки, робити вибір, ставити запитання, створювати повідомлення та брати участь у спільній діяльності. У цьому контексті АДК доцільно розглядати не лише як компенсаторний засіб для задоволення базових комунікативних потреб, а і як інструмент творчої діяльності. За допомогою символів і цифрових комунікативних систем учень може створювати власні висловлювання, складати історії, брати участь у рольових іграх, проєктах та колективному обговоренні *(Гнізділова О., Дубовик Ю., & Бурсова С., 2026).*

Окремим напрямом цифрової адаптації є творче переоформлення навчального матеріалу з урахуванням конкретного освітнього бар'єра. Якщо бар'єром є надмірний обсяг тексту, доцільним рішенням може стати його структурування та візуалізація. Якщо труднощі виникають під час розуміння послідовності дій – використання покрокової інструкції або інтерактивної схеми. У разі комунікативних труднощів – залучення символів, піктограм або

АДК. Якщо проблема пов’язана з підтриманням уваги та мотивації – доцільними можуть бути ігрові механіки, квестові завдання, короткі інтерактивні активності та миттєвий зворотний зв’язок. Отже, цифровий інструмент має обиратися не за принципом його технологічної новизни, а відповідно до конкретного бар’єра та педагогічної *мети (Боряк О., & Косенко Ю., 2021).*

Водночас використання цифрових технологій саме по собі не гарантує інклюзивності. Надмірна кількість анімацій, складна навігація, перевантажений інтерфейс, нечіткі інструкції або необхідність виконувати завдання лише одним способом можуть створювати нові бар’єри. Тому цифровий контент має проєктуватися з урахуванням принципів доступності: зрозумілої навігації, логічної структури, достатньої візуальної виразності, чітких інструкцій, передбачуваності взаємодії та можливості використання допоміжних технологій. Особливо важливо передбачати різні способи сприймання інформації та різні способи демонстрації результату.

Таким чином, цифрова адаптація навчального контенту є не технічним перенесенням традиційних матеріалів у цифрове середовище, а творчим педагогічним процесом проєктування доступного освітнього досвіду. Її основною метою є не спрощення навчання для окремих категорій учнів, а усунення бар’єрів, які перешкоджають їхній участі, самовираженню та досягненню освітніх результатів. Поєднання цифрових, інтерактивних та асистивних технологій створює умови, за яких кожен учень може обирати доступний спосіб взаємодії з інформацією, комунікації та представлення власних ідей. У такому розумінні цифрові технології стають не лише засобом адаптації навчання, а ресурсом розвитку творчості, автономії та суб’єктності здобувача освіти в інклюзивному середовищі.

Ми з’ясували, що одним із перспективних напрямів цифровізації інклюзивної освіти є використання інтерактивних навчальних ресурсів, які змінюють характер взаємодії учня з освітнім контентом. Якщо традиційне

подання матеріалу переважно передбачає читання, слухання або спостереження, то інтерактивне середовище залучає здобувача освіти до активної дії: вибору, порівняння, класифікації, встановлення відповідностей, пошуку помилок, конструювання відповіді, розв'язання проблемної ситуації. Такий підхід особливо важливий в умовах інклюзивного навчання, оскільки створює додаткові можливості для участі учнів із різними освітніми потребами та дозволяє варіювати способи взаємодії з навчальним матеріалом.

Серед цифрових інструментів, що забезпечують створення інтерактивного контенту, особливе місце посідає *H5P (Jacob T., & Centofanti S., 2024).* Його педагогічний потенціал полягає у можливості перетворювати статичний навчальний матеріал на інтерактивний освітній досвід. За допомогою H5P можна створювати інтерактивні презентації, тести, вправи на встановлення відповідностей, перетягування об'єктів, заповнення пропусків, інтерактивні відео, часові лінії та інші види навчальної діяльності. Важливо, що учень у такому форматі не залишається пасивним споживачем інформації: він має виконати певну дію, прийняти рішення та одразу отримати інформацію про результат.

Особливу цінність для інклюзивного освітнього середовища становить можливість поєднувати різні канали подання інформації. Наприклад, короткий текст може супроводжуватися зображенням, аудіофрагментом або відео; теоретичний матеріал – інтерактивним запитанням; інструкція – візуальною послідовністю дій. Це дає змогу враховувати відмінності у способах сприймання та опрацювання інформації. Водночас інтерактивність має бути педагогічно обґрунтованою: кожен елемент цифрового ресурсу повинен виконувати певну навчальну функцію, а не використовуватися лише для зовнішньої привабливості.

Важливим засобом залучення є інтерактивне завдання як форма активного навчання. На відміну від традиційного запитання, яке часто передбачає одну форму відповіді, цифрова вправа може запропонувати учневі

здійснити конкретну дію: знайти відповідний об’єкт, розподілити інформацію за категоріями, визначити правильну послідовність, виявити помилку, обрати спосіб розв’язання або створити власний варіант відповіді. Такі завдання активізують не лише відтворення знань, а й операції аналізу, порівняння, класифікації, оцінювання та створення. У цьому виявляється їхній зв’язок із таксономією Блума та компетентнісним підходом до навчання *(Jacob T., & Centofanti S., 2024)*.

Інтерактивність може також використовуватися для диференціації навчальної діяльності. Для одних учнів завдання може містити додаткові візуальні підказки, приклад виконання або більшу кількість проміжних кроків, тоді як інші можуть працювати з відкритим проблемним завданням без додаткової підтримки. Можливість повторного виконання вправи, отримання миттєвого зворотного зв’язку та поступового ускладнення завдань сприяє формуванню відчуття успіху й підтримує мотивацію до навчання. Таким чином, цифрова інтерактивність може бути інструментом не лише контролю знань, а й педагогічної підтримки.

Не менш важливим ресурсом залучення є мультимедійний контент. Відео, анімації, аудіоматеріали, інфографіка, інтерактивні схеми та візуальні моделі дозволяють представити складне явище в різних формах. Наприклад, процес, який складно пояснити лише словами, можна продемонструвати за допомогою короткої анімації; послідовність дій – за допомогою відео; взаємозв’язки між поняттями – через схему або інфографіку. Для учнів, які мають труднощі з тривалим сприйманням текстової інформації, мультимедійне подання може стати додатковою опорою для розуміння змісту *(Jacob T., & Centofanti S., 2024)*.

Водночас мультимедійність доцільно поєднувати з активною взаємодією. Наприклад, після короткого відеофрагмента учневі можна запропонувати визначити ключову проблему, встановити правильну послідовність подій або обрати оптимальне рішення. Інтерактивне відео в H5P дозволяє інтегрувати запитання безпосередньо в процес перегляду, завдяки чому перегляд

перетворюється на активне навчання. Подібна організація сприяє концентрації уваги та допомагає пов'язати отриману інформацію з практичною діяльністю *(Jacob T., & Centofanti S., 2024)*.

Особливо перспективним є поєднання інтерактивності, гейміфікації та творчих практик. Навчальний матеріал може бути представлений у формі квесту, місії, серії завдань або проблемної історії, у якій учень поступово досягає певної мети. При цьому ігровий формат не повинен замінювати навчальний зміст. Його функція полягає у створенні ситуації вибору, виклику, пошуку рішення та отримання результату. Для учнів з різними освітніми потребами така організація діяльності може передбачати різний темп роботи, різний рівень підтримки та альтернативні способи виконання завдань, зберігаючи спільну навчальну мету.

Значний потенціал мають також творчі інтерактивні завдання, у яких учень не лише обирає правильну відповідь, а створює власний продукт. Це може бути цифрова історія, комікс, схема, презентація, аудіоповідомлення, відео або візуальна відповідь. Такий підхід дозволяє перейти від моделі «учень виконує завдання» до моделі «учень створює власний освітній продукт». Для інклюзивної освіти це принципово важливо, оскільки дає можливість врахувати індивідуальні способи самовираження та зробити творчість доступною для учнів із різними можливостями.

Отже, H5P, інтерактивні завдання та мультимедійні ресурси можуть розглядатися як засоби активізації, диференціації та творчого залучення учнів до освітнього процесу. Їхня цінність полягає не в самій технологічності, а у можливості створювати різні маршрути взаємодії з навчальним змістом, забезпечувати оперативний зворотний зв'язок, підтримувати мотивацію та надавати учневі можливість діяти й створювати. У контексті інклюзивної освіти це сприяє переходу від однакового для всіх способу навчання до гнучкого цифрового середовища, у якому доступність, активність і творчість стають взаємопов'язаними складовими освітнього процесу (*Яковишина Т., 2026)*.

Важливою умовою інклюзивної освіти є забезпечення можливості кожної дитини не лише сприймати навчальну інформацію, а й висловлювати власні думки, робити вибір, ставити запитання, ініціювати взаємодію та брати участь у спільній діяльності. Для дітей, які мають значні труднощі усного мовлення або не використовують його як основний засіб комунікації, такі можливості можуть забезпечуватися засобами альтернативної та додаткової комунікації (АДК). У цьому контексті АДК доцільно розглядати не лише як засіб компенсації комунікативних труднощів, а як ресурс забезпечення активної участі дитини в освітньому та творчому процесах.

Використання АДК розширює можливості дитини для реалізації базових комунікативних функцій: повідомлення про потреби, вираження емоцій, здійснення вибору, відмови, привітання, звернення до іншої особи. Проте повноцінна комунікація не обмежується цими функціями. Дитині необхідно мати можливість коментувати події, жартувати, фантазувати, розповідати, ставити запитання, висловлювати власну думку та ініціювати взаємодію. Саме тому комунікативна система має містити не лише слова, пов'язані з повсякденними потребами, а й лексику, яка дає змогу створювати нові повідомлення та виражати індивідуальність дитини.

Особливо важливою є роль АДК у творчій діяльності, оскільки творчість передбачає можливість вибору, самовираження, висування власних ідей та створення нового продукту. Дитина, яка використовує АДК, може обирати матеріали та кольори під час малювання, визначати персонажів і сюжет власної історії, пропонувати варіант розвитку подій, брати участь у театралізованій діяльності, створювати розповідь або коментувати результати спільного проєкту. Наприклад, під час створення казки дитина може за допомогою символів обрати героя, місце дії, його емоцію та подальшу подію; під час мистецької діяльності – повідомити про бажаний колір або матеріал; у груповому проєкті – запропонувати власну ідею чи оцінити запропонований варіант.

Таким чином, АДК може забезпечувати різні етапи творчого процесу: генерування ідеї, вибір способу її реалізації, планування послідовності дій, взаємодію з іншими учасниками та представлення кінцевого результату. Це особливо важливо для уникнення ситуації, коли дитина фізично присутня на творчому занятті, але фактично залишається пасивним спостерігачем. Наявність доступного способу комунікації дає змогу перетворити її з об'єкта допомоги на активного учасника спільної діяльності.

Ефективність такого підходу значною мірою залежить від того, як організовано доступ до комунікативної системи. Засоби АДК мають бути доступними дитині в момент виникнення потреби в комунікації, а їхня структура – передбачуваною та зрозумілою. Якщо для створення одного повідомлення дитині необхідно пройти надто багато рівнів навігації або шукати потрібний символ серед великої кількості елементів, це може суттєво обмежувати спонтанність її творчого висловлювання. Тому під час проєктування АДК важливо передбачати швидкий доступ до часто використовуваної лексики, тематичних категорій, слів для опису емоцій, оцінювання, запитань, дій та творчих задумів *(Боряк О., & Косенко Ю., 2021)*.

Цифрові засоби АДК додатково розширюють можливості творчого самовираження. Комунікативні пристрої та застосунки можуть поєднувати символи, текст, фотографії, аудіо та синтезоване мовлення. Це дозволяє дитині не лише вибирати готові повідомлення, а й конструювати власні висловлювання. Наприклад, під час роботи над цифровою історією дитина може послідовно обирати персонажів, дії та емоції, формуючи за допомогою АДК власний сюжет. У такий спосіб технологія стає не просто засобом передачі вже сформованої думки, а інструментом її конструювання та творчого розвитку.

Важливим є також залучення АДК до колективної творчої діяльності. У парній або груповій роботі дитина має отримувати реальні можливості впливати на спільний результат: пропонувати ідеї, погоджуватися або не

погоджуватися із пропозиціями інших, розподіляти ролі, обирати матеріали, оцінювати проміжні результати. Педагог у такому випадку має не говорити замість дитини, а створювати умови для того, щоб вона могла висловитися самостійно. Це потребує додаткового часу для комунікації, терплячого очікування відповіді та прийняття альтернативного способу висловлювання як повноцінного.

Отже, використання АДК в інклюзивній освіті має виходити за межі забезпечення мінімально необхідної комунікації. Її потенціал полягає у створенні умов для ініціативи, вибору, самовираження, творчого задуму та спільної діяльності. Доступна комунікація є передумовою того, щоб дитина могла не лише відповідати на запитання дорослого, а й сама ініціювати взаємодію, пропонувати власні ідеї та впливати на перебіг освітнього процесу. У цьому розумінні АДК стає важливим інструментом реалізації творчого потенціалу дитини та забезпечення її повноцінної суб'єктної участі в інклюзивному освітньому середовищі *(Боряк О., & Косенко Ю., 2021).*

Творча адаптація навчальних матеріалів для учнів з особливими освітніми потребами (ООП) передбачає цілеспрямоване перетворення змісту, форми його подання та способу виконання завдань відповідно до індивідуальних можливостей і потреб дитини. Її сутність полягає не лише у спрощенні навчального матеріалу, а у пошуку таких способів його представлення, які забезпечують доступність, активну участь і можливість самостійного досягнення освітньої мети. Тому адаптація може передбачати зміну тексту, візуалізацію інформації, використання символів, інтерактивних елементів, аудіо- та відеоматеріалів, а також надання учневі різних способів демонстрації результату.

Одним із найпоширеніших напрямів адаптації є перетворення складного текстового матеріалу на структурований і візуально доступний контент. Наприклад, великий інформаційний текст можна поділити на короткі смислові блоки, виділити ключові слова, доповнити фотографіями, піктограмами,

схемами або інфографікою. Замість завдання «Прочитай текст і перекажи його зміст» можна запропонувати учневі визначити головних героїв за зображеннями, встановити послідовність подій, обрати ключові слова або скласти коротке повідомлення за візуальними опорами. Така адаптація дає змогу зберегти змістову мету завдання, одночасно зменшуючи бар'єри, пов'язані з великим обсягом текстової інформації.

Для учнів, які мають труднощі з розумінням інструкцій, ефективним є перетворення словесної інструкції на алгоритм дій. Наприклад, замість складної багатокомпонентної вказівки «Прочитай текст, визнач основну думку, добери заголовок і поясни свою відповідь» її можна представити у вигляді послідовності: «1. Прочитай. 2. Знайди головне. 3. Обери заголовок. 4. Поясни свій вибір». Кожен крок може супроводжуватися відповідною піктограмою. Такий формат підвищує передбачуваність діяльності та допомагає учневі самостійно контролювати послідовність виконання завдання.

Важливим напрямом творчої адаптації є трансформація традиційних завдань у завдання з елементами гри та дослідження. Наприклад, вправу на класифікацію предметів можна представити як «розслідування», під час якого учень має знайти «зайвий» об'єкт і пояснити свій вибір. Завдання на встановлення послідовності можна перетворити на створення історії за картинками, а вивчення природних явищ — на міні-дослідження з фотографуванням, спостереженням і фіксацією результатів. Такий підхід дозволяє зберегти навчальний зміст, але змінити характер діяльності: замість механічного виконання вправи учень отримує ситуацію пошуку, вибору та відкриття *(Гордійчук О., 2026).*

Для учнів із труднощами усного мовлення або комунікації важливим є використання засобів альтернативної та додаткової комунікації (АДК). Наприклад, під час уроку «Я досліджую світ» учневі можна запропонувати набір символів для позначення властивостей об'єктів: «великий – маленький», «твердий – м'який», «теплий — холодний», «подобається – не подобається».

Під час створення казки дитина може за допомогою символів обрати персонажа, місце події, емоцію та дію. Таким чином, АДК забезпечує не лише можливість відповісти на запитання вчителя, а й самостійно формувати творчий задум.

Творча адаптація особливо важлива під час виконання завдань, результатом яких має бути певний продукт. Традиційну вимогу написати твір, наприклад, можна трансформувати у завдання «Створи історію про…», дозволивши учневі обрати спосіб її представлення: написати текст, скласти комікс, створити серію малюнків із короткими підписами, записати аудіорозповідь, підготувати відео або використати символи АДК. У такому випадку спільною залишається освітня мета – побудувати зв'язну історію, передати послідовність подій та виразити власний задум, – тоді як форма творчого продукту може бути індивідуальною.

Для учнів із порушеннями зору навчальний матеріал може адаптуватися шляхом збільшення шрифту, підвищення контрастності, використання рельєфних або тактильних матеріалів, аудіоописів та цифрових засобів озвучування тексту. Водночас творчий підхід передбачає пошук способів включення дитини в діяльність, яка традиційно має переважно візуальний характер. Наприклад, під час образотворчої діяльності можна використовувати тактильні матеріали та об'ємні форми, а під час роботи з ілюстрацією – словесний опис, аудіоматеріал та можливість створити власний образ за допомогою доступних засобів *(Гнізділова О., Дубовик Ю., & Бурсова С., 2026).*

Для учнів із труднощами слухового сприймання доцільним є посилення візуальної складової навчального контенту. Усне пояснення вчителя може супроводжуватися короткими текстовими тезами, схемами, фотографіями, жестами, субтитрами або візуальною послідовністю дій. Наприклад, під час експерименту кожен етап може бути представлений окремою карткою із зображенням та короткою інструкцією. Учень отримує можливість не лише

стежити за діяльністю групи, а й самостійно виконувати необхідні дії відповідно до візуального алгоритму.

Для дітей з розладами аутистичного спектра та іншими особливостями, що можуть ускладнювати сприймання невизначених ситуацій, важливою є структурованість і передбачуваність навчального матеріалу. Творча адаптація в цьому випадку може передбачати використання візуального розкладу, чіткої послідовності етапів, карток вибору та коротких передбачуваних інструкцій. Наприклад, творче завдання «Створи малюнок на вільну тему» можна конкретизувати через доступний вибір: «Обери героя → обери місце → обери колір → створи малюнок». Такий підхід зменшує невизначеність, але не позбавляє дитину можливості творчого вибору *(Гнізділова О., Дубовик Ю., & Бурсова С., 2026)*.

Цікавим напрямом є також цифрова трансформація адаптованих матеріалів. Один і той самий навчальний матеріал може бути представлений у форматі інтерактивної презентації, відео, інтерактивної вправи або цифрового квесту. Наприклад, замість паперової вправи на встановлення відповідностей учень може перетягувати об’єкти у відповідні категорії; замість традиційного тесту – взаємодіяти з інтерактивною презентацією; замість письмового переказу – створити цифрову історію з використанням зображень і коротких текстових або аудіоповідомлень. Такі рішення дають змогу регулювати темп роботи, кількість завдань, рівень підказок і спосіб отримання зворотного зв’язку.

Показовим є перетворення звичайного завдання на багаторівневу творчу діяльність. Наприклад, завдання «Опиши картину» може мати декілька доступних варіантів: учень може назвати зображені об’єкти; скласти речення за поданими словами; розташувати символи у правильній послідовності; придумати діалог між персонажами; створити власну історію за картиною. Таким чином, диференціація не означає механічного зменшення складності. Навпаки, вона дає змогу кожному учневі працювати в межах спільної теми, але обирати доступний рівень підтримки та спосіб творчого самовираження.

Отже, творча адаптація навчальних матеріалів для учнів з ООП може здійснюватися за різними напрямами: текст → візуальна структура; складна інструкція → покроковий алгоритм; пасивне завдання → гра або дослідження; усна відповідь → АДК; письмовий продукт → вибір різних форм творчого представлення; статичний матеріал → інтерактивний цифровий ресурс. Визначальним є збереження освітньої мети за одночасного усунення бар'єрів, які перешкоджають участі конкретного учня. Такий підхід дає змогу перейти від адаптації «під дефіцит» до адаптації «під можливості», коли освітній матеріал не обмежує дитину одним способом дії, а відкриває простір для вибору, ініціативи, творчості та самостійного створення власного результату.

Отже, цифрові та асистивні технології є важливим ресурсом розвитку творчості в умовах інклюзивної освіти, оскільки розширюють можливості учнів щодо сприймання навчальної інформації, взаємодії з нею, комунікації та представлення власного результату. Їх педагогічна цінність визначається не самим фактом використання цифрових засобів, а можливістю створити різні доступні шляхи досягнення спільної освітньої мети з урахуванням індивідуальних можливостей і потреб учнів.

Цифрова адаптація навчального контенту передбачає не механічне перенесення традиційних матеріалів в електронний формат, а їх творче переосмислення: структурування інформації, використання візуальних і аудіальних опор, інтерактивних елементів, мультимедіа, покрокових інструкцій та різних способів виконання завдань. Особливе значення мають інтерактивні ресурси, зокрема H5P, які дають змогу залучати учнів до вибору, порівняння, класифікації, пошуку рішень, створення власних продуктів і рефлексії.

Асистивні технології та засоби альтернативної і додаткової комунікації (АДК) істотно розширюють можливості творчого самовираження учнів, які мають труднощі з мовленням, рухом, сприйманням або традиційними способами виконання навчальних завдань. За їх допомогою учень може не лише демонструвати засвоєні знання, а й створювати власні висловлювання,

історії, проєкти, візуальні композиції та інші творчі продукти. Таким чином, асистивні технології сприяють переходу від позиції пасивного споживача інформації до позиції активного учасника й автора освітньої діяльності.

Водночас використання цифрових та асистивних технологій не гарантує автоматичного забезпечення інклюзивності. Їх ефективність залежить від доступності інтерфейсу, зрозумілості навігації, відповідності віковим і когнітивним можливостям учня, можливості використання альтернативних способів взаємодії та узгодженості технологічного рішення з конкретними освітніми потребами. Тому ключовим завданням педагога є не просто добір технології, а її педагогічне проєктування й адаптація.

Отже, цифрові та асистивні технології доцільно розглядати як інструменти розширення творчої свободи учня. Їх використання дає змогу зберігати спільну освітню мету, водночас забезпечуючи різні способи її досягнення та різні форми творчого самовираження. Саме такий підхід перетворює технології з додаткового технічного засобу на дієвий ресурс подолання освітніх бар'єрів, персоналізації навчання та повноцінної участі кожного учня в інклюзивному освітньому процесі.

Висновки. Проведене дослідження дає підстави стверджувати, що творчість є важливим ресурсом забезпечення інклюзивності освітнього процесу, оскільки створює передумови для гнучкого реагування на різноманітність освітніх потреб учнів. У цьому контексті творчість розглядається не лише як здатність до створення нового, а як спосіб пошуку педагогічних рішень, подолання освітніх бар'єрів, індивідуалізації навчання та забезпечення можливостей для самовираження кожного учня. Творчий потенціал учителя виявляється у здатності адаптувати зміст, способи діяльності, навчальні матеріали та форми взаємодії відповідно до можливостей конкретної дитини. Важливою умовою реалізації такого підходу є створення безпечного, психологічно комфортного й прийнятного для всіх учнів освітнього

середовища, у якому різноманітність сприймається як природна характеристика освітнього процесу.

Розкриття творчого потенціалу учнів потребує відповідного педагогічного інструментарію. Аналіз інноваційних педагогічних технологій засвідчив, що креативні методи навчання, гейміфікація, квест-технології, артпедагогіка, проєктне та проблемне навчання створюють умови для активної участі, самостійного пошуку, вибору, експериментування та створення власних продуктів. Їх використання в інклюзивному навчанні потребує гнучкого пристосування до індивідуальних можливостей і потреб учнів. У цьому аспекті Universal Design for Learning виступає важливою основою проєктування доступних творчих завдань, оскільки передбачає різноманітність способів залучення до діяльності, представлення навчальної інформації та демонстрації результатів. Отже, інклюзивне творче завдання має не спрощувати діяльність учня, а забезпечувати доступний спосіб її виконання зі збереженням визначеної освітньої мети.

Водночас сучасний інклюзивний освітній процес значно розширює свої можливості завдяки цифровим та асистивним технологіям. Цифрова адаптація навчального контенту дає змогу змінювати його структуру, спосіб подання, обсяг і форму взаємодії відповідно до потреб учнів. H5P, інтерактивні завдання та мультимедійні ресурси забезпечують активізацію навчальної діяльності, поєднання різних каналів сприймання інформації, диференціацію завдань та організацію різних форм творчої роботи. Особливе значення для учнів із труднощами комунікації мають засоби альтернативної та додаткової комунікації, які розширюють можливості висловлення думок, здійснення вибору, взаємодії та участі у творчій діяльності. Творча адаптація навчальних матеріалів для учнів з особливими освітніми потребами при цьому передбачає використання візуальних опор, покрокових інструкцій, символів, різних форм представлення інформації та альтернативних способів створення й демонстрації результату.

Таким чином, розглянуті підходи утворюють взаємопов'язану систему: творчість визначає педагогічну позицію та логіку діяльності; інноваційні технології забезпечують способи організації творчого навчання; цифрові та асистивні засоби розширюють доступні можливості для участі й самовираження учнів. Їх поєднання сприяє подоланню освітніх бар'єрів та створенню умов, за яких учень може не лише засвоювати навчальний матеріал, а й діяти, обирати, досліджувати, комунікувати та створювати.

Отже, ключовим результатом творчого підходу до інклюзивної освіти є розширення можливостей кожного учня бути активним суб'єктом освітнього процесу. Саме тому ефективність інноваційних, цифрових та асистивних технологій доцільно визначати не їх технологічною новизною, а тим, наскільки вони сприяють доступності навчання, індивідуалізації освітньої діяльності, подоланню бар'єрів і реалізації творчого потенціалу кожної дитини.

References:

Боряк О., & Косенко Ю. (2021). Альтернативна комунікація як засіб розвитку мовленнєвої діяльності дітей із комплексними порушеннями. *Актуальні питання гуманітарних наук,* 35(1), 264-270. DOI: https://doi.org/10.24919/2308-4863/35-1-41

Гнізділова О., Дубовик Ю., & Бурсова С. (2026). Альтернативна та додаткова комунікація в освітньому процесі закладу дошкільної освіти: теоретико-практичний аспект. *Витоки педагогічної майстерності*, 37, 31-38. DOI: https://doi.org/10.33989/2075-146x.2026.37.361580

Гордійчук О. (2026). Інклюзивна педагогіка та технології навчання учнів з особливими освітніми потребами: інтеграція теорії, практики та нормативного забезпечення. *Педагогічна академія: наукові записки*. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20535223

Діомідова Н., Марєєва Т., & Мінько Н. (2021). Практичні засади застосування арттерапії та артпедагогіки як методів інклюзивного навчання осіб з особливими освітніми потребами. *Інноваційна педагогіка*, 39, 143-146. DOI: https://doi.org/10.32843/2663-6085/2021/39.28

Донець В. (2021). Організація інноваційної діяльності в закладах загальної середньої освіти в умовах інклюзивного навчання. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України*. Серія: педагогічні науки, 22(3), 48-66. DOI: https://doi.org/10.32453/pedzbirnyk.v22i3.511

Звєкова В. (2023). Розвиток творчої активності дітей з особливими освітніми потребами під час гурткової роботи. *Духовність особистості: методологія, теорія і практика,* 1(2(106)), 68-76. DOI: https://doi.org/10.33216/2220-6310/2023-106-2-68-76

Лук'яник Л., Пєхарєва А., & Ільченко О. (2023). Застосування інформаційних технологій під час корекції мовленнєвих порушень у дітей молодшого шкільного віку. *Духовність особистості: методологія, теорія і практика*, 3(107), 57-66. DOI: https://doi.org/10.33216/2220-6310/2023-107-3-57-66

Моляко В., Третяк Т., Ваганова Н., & Шепельова М. (2020). Розуміння нової інформації як процес розв'язування задач. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. Вернадського.* Серія: Психологія, 31(70), № 4, 42-50. DOI: https://doi.org/10.32838/2709-3093/2020.4/06

Пісняк В. (2023). Застосування цифрових технологій у підготовці майбутніх учителів початкової школи до формування трудових компетентностей учнів з обмеженими можливостями здоров'я. *Інформаційні технології і засоби навчання*, 94 (2), 38-53. DOI: https://doi.org/10.33407/itlt.v94i2.5031

Помирча С., & Семіряжко А. (2023). Творчі завдання як засіб розвитку креативного мислення на уроках української мови в початковій школі. *Гуманізація навчально-виховного процесу*, 2(104), 127-136. DOI: https://doi.org/10.31865/2077-1827.2(104)2023.292314

Савінова Н., & Нездатна А. (2023). Вплив ігротерапії на мовленнєвий розвиток дитини з особливими освітніми потребами в історичному дискурсі. *Особлива дитина: навчання і виховання,* 112(4), 24-39. DOI: https://doi.org/10.33189/ectu.v112i4.154

Сисоєва С. (2024). Pedagogical creativity. Development of artistic and creative competence of teacher and student. *Неперервна професійна освіта: теорія та практика*, 3(80), 19-30. DOI: https://doi.org/10.28925/2412-0774.2024.3.2

Харківська А. (2024). Арттехніки у корекційній роботі з дітьми з мовленнєвими порушеннями. *Освіта. Інноватика. Практика*, 12(4), 48-52. DOI: https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol12i4-008

Фамілярська Л. (2023). Цифрові технології для розбудови інклюзивного освітнього середовища. *Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету,* 15, 151-162. DOI: https://doi.org/10.28925/2414-0325.2023.1512

Чугай С., & Хващевська О. (2024). Педагогічні умови розвитку творчих здібностей здобувачів початкової освіти на уроках мистецтва. *Професіоналізм педагога: теоретичні й методичні аспекти*, (21), 147-159. DOI: https://doi.org/10.31865/2414-9292.21.2024.307984

Шевчук О., & Семенишена Р. (2024). Вплив цифрових технологій на інклюзивну освіту: виклики та перспективи. *Інклюзія і суспільство*, 2(7). DOI: https://doi.org/10.32782/2787-5137-2024-2-9

Яковишина Т. (2026). Розвиток педагогічної творчості майбутнього вчителя початкових класів як чинник професійного становлення в умовах сучасного освітнього середовища. *Science and education in the third millennium: Information Technology, Education, Law, Psychology, Social Security and Work, Management.* International collective monograph. Volume I. Institute of Public Administration Affairs. Lublin, Polska, Lublin. 728-762. DOI: http://doi.org.10.5281/zenodo.20811167

Jacob, T., & Centofanti, S. (2024). Effectiveness of H5P in improving student learning outcomes in an online tertiary education setting. *Journal of Computing in Higher Education*, 36(2), 469-485. DOI: https://doi.org/10.1007/s12528-023-09361-6

Navas-Bonilla, C. del R., Guerra-Arango, J. A., Oviedo-Guado, D. A., & Murillo-Noriega, D. E. (2025). Inclusive education through technology: A systematic review of types, tools and characteristics. *Frontiers in Education*, 10, 1527851. DOI: https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1527851

CONTENTS

CHAPTER 1. GRAPH THEORY METHODS IN MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX NETWORK SYSTEMS…….. 7

CHAPTER 2. NON-TECHNICAL COMPETENCIES OF THE SEAFARER AMID THE DIGITAL TRANSFORMATION OF SHIPPING: SOFT SKILLS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND THE GENDER DIMENSION OF STCW CONVENTION REFORM 52

CHAPTER 3. TRANSFORMATION OF MILITARY EDUCATION IN ACCORDANCE WITH THE SAT METHODOLOGY: THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES AND GROUND ROBOTIC SYSTEMS IN THE TRAINING OF FUTURE OFFICERS OF THE SECURITY AND DEFENCE FORCES..... 85

CHAPTER 4. STUDENT SCIENTIFIC COMPETITIONS AS A FACTOR IN THE PROFESSIONAL GROWTH OF FUTURE SPECIALISTS 122

CHAPTER 5. DESIGNING DIGITAL INFORMATION RESOURCES FOR VOCATIONAL EDUCATION INSTITUTIONS BASED ON THE «LIBRARY» DATABASE 152

CHAPTER 6. THE USE OF SECONDARY GRAIN RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF FLOUR-BASED CONFECTIONERY PRODUCTS WITH AN INCREASED FIBRE CONTENT 184

CHAPTER 7. DIGITAL TECHNOLOGIES AND GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DEVELOPING FOREIGN LANGUAGE COMMUNICATIVE COMPETENCE OF MILITARY EDUCATION LEARNERS 221

CHAPTER 8. DIDACTIC FOUNDATIONS OF DIGITALIZING DISCRETE MATHEMATICS TEACHING: VISUALIZATION, PERSONALIZATION, AND ADAPTIVE MONITORING 259

CHAPTER 9. INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF SOCIAL WORK FOR THE PREVENTION OF CYBERBULLISHING IN THE STUDENT ENVIRONMENT OF GENERAL SECONDARY EDUCATION INSTITUTIONS..... 291

CHAPTER 10. STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF EMPIRICAL RESULTS IN THE DEVELOPMENT OF DIGITAL SKILLS OF FUTURE VOCATIONAL EDUCATION TEACHERS..... 327

CHAPTER 11. THEORETICAL AND PEDAGOGICAL FOUNDATIONS FOR DEVELOPING PRIMARY SCHOOL PUPILS' EMOTIONAL AND VALUE-BASED ATTITUDES TOWARD NATURE..... 365

CHAPTER 12. FROM LANGUAGE LEARNING TO DIGITAL INTELLIGENCE: RETHINKING ENGLISH EDUCATION IN THE AI ERA 404

CHAPTER 13. FROM LABORATORY TO ORBIT: A REVIEW OF KEY DIRECTIONS IN SPACE BIOTECHNOLOGY 446

CHAPTER 14. THEORETICAL AND PRACTICAL FOUNDATIONS OF PREPARING HIGHER EDUCATION STUDENTS TO PROVIDE FIRST PRE-MEDICAL EMERGENCY CARE..... 487

CHAPTER 15. THE CASE-BASED LEARNING IN THE FORM OF A PEER ROLE-PLAY IN MEDICAL EDUCATIONTHE 525

CHAPTER 16. MULTI-AGENT AI SYSTEMS ARCHITECTURE FOR UNIVERSITY EDUCATION TRANSFORMATION: FROM ADAPTIVE LEARNING TO ADMINISTRATIVE DECISIONS 560

CHAPTER 17. CREATIVITY AS A RESOURCE FOR INCLUSIVE EDUCATION: INNOVATIVE TEACHING METHODS AND PRACTICES 605

UDK 001:37:001.895
I-67

I-67 INNOVATIONS IN EDUCATION AND SCIENCE: informational, economic, educational, artistic, legal, psychological, technical and managerial aspects: International collective monograph on the topic. Volume I. ISAP, Lublin, Poland, 2026. 645 p.

The collective monograph is the result of the generalisation of conceptual work by scientists who study current topics in fields such as Information Technology, Economics, Education, Law, Psychology, Engineering, and Management, viewed through the lens of innovations in education and science.

It is intended for scientists, educators, PhD candidates, master's students, university staff, stakeholders, managers, employees of management bodies at various hierarchical levels, and anyone interested in current issues in Information Technology, Economics, Education, Law, Psychology, Engineering, and Management, all in the context of innovations in education and science.

ISBN: 978-83-8338-408-6
ISBN: 978-617-95591-3-6