

ISSN 2786-5460 (Print)
ISSN 2786-5479 (Online)

МІЖРЕГІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ
INTERREGIONAL ACADEMY OF PERSONNEL MANAGEMENT



ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СУСПІЛЬСТВО

INFORMATION TECHNOLOGY AND SOCIETY

Випуск 2 (17), 2025
Issue 2 (17), 2025



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Міжрегіональної Академії управління персоналом
(протокол № 7 від 29 серпня 2025 року)*

Інформаційні технології та суспільство / [головний редактор О. Попов]. – Київ : Міжрегіональна Академія управління персоналом, 2025. – Випуск 2 (17). – 226 с.

Журнал «Інформаційні технології та суспільство» є науковим рецензованим виданням, в якому здійснюється публікація матеріалів науковців різних рівнів у вигляді наукових статей з метою їх поширення як серед вітчизняних дослідників, так і за кордоном.

Редакційна колегія не обов'язково поділяє позицію, висловлену авторами у статтях, та не несе відповідальності за достовірність наведених даних і посилань.

Головний редактор: **Попов О. О.** – член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор, в.о. директора Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України.

Редакційна колегія:

Василенко М. Д. – д-р фіз.-мат. наук, проф., професор кафедри кібербезпеки, Національний університет «Одеська юридична академія»; **Горбов І. В.** – канд. техн. наук, с.н.с., старший науковий співробітник, Інститут проблем реєстрації інформації НАН України; **Дуднік А. С.** – д-р техн. наук, доц., доцент кафедри мережних та інтернет технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Євсєєв С. П.** – д-р техн. наук, лауреат національної премії імені Патона 2024 р., професор кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет «ХПІ»; **Зибін С. В.** – д-р техн. наук, доц., завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний авіаційний університет; **Кавун С. В.** – д-р екон. наук, канд. техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних систем та технологій, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Комарова Л. О.** – д-р техн. наук, с.н.с., директор Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Охріменко Т. О.** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії протидії кіберзагрозам в авіаційній галузі, Національний авіаційний університет; **Рудніченко М. Д.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Скуратовський Р. В.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри обчислювальної математики та комп'ютерного моделювання, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Супрун О. М.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри програмних систем і технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Табунщик Г. В.** – канд. техн. наук, проф., професор кафедри програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка»; **Фомін О. О.** – д-р техн. наук, доц., професор кафедри комп'ютеризованих систем управління, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Хохлачова Ю. С.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний авіаційний університет; **Чолишкіна О. Г.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри Інтелектуальних технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Чорний О. П.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту електричної інженерії та інформаційних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; **Юдін О. К.** – д-р техн. наук, проф., директор центру кібербезпеки Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Гопеснко Віктор** – dr. sc. ing., проф., проректор з наукової роботи, директор навчальної програми магістратури «Комп'ютерні системи», Університет прикладних наук ISMA (Латвійська Республіка); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., професор кафедри комп'ютерних наук у менеджменті, Гданський технологічний університет (Республіка Польща).

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:

Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1173 від 11.04.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-03890

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Приватне акціонерне товариство «Вищий навчальний заклад «Міжрегіональна Академія управління персоналом» (вул. Фрометівська, буд. 2, м. Київ, 03039, iart@iart.edu.ua, тел. (044) 490-95-00).

Мова видання: українська, англійська, німецька, французька та польська.

Періодичність видання: 4 рази на рік.

Відповідно до Наказу МОН України № 1290 від 30 листопада 2021 року (додаток 3) журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія Б) зі спеціальностей F2 – Інженерія програмного забезпечення; F3 – Комп'ютерні науки; F4 – Системний аналіз та наука про дані; F5 – Кібербезпека та захист інформації; F6 – Інформаційні системи і технології; F7 – Комп'ютерна інженерія.

Усі електронні версії статей журналу оприлюднюються на офіційній сторінці видання
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення
StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Recommended for publication
by Interregional Academy of Personnel Management
(Minutes No. 7 dated 29 August 2025)**

Information Technology and Society / [chief editor Oleksandr Popov]. – Kyiv : Interregional Academy of Personnel Management, 2025. – Issue 2 (17). – 226 p.

Journal «Information Technology and Society» is a peer-reviewed scientific edition, which publishes materials of scientists of various levels in the form of scientific articles for the purpose of their dissemination both among domestic researchers and abroad.

Editorial board do not necessarily reflect the position expressed by the authors of articles, and are not responsible for the accuracy of the data and references.

Chief editor: Oleksandr Popov – Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Engineering, Professor, Acting Director of the Center for Information-Analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Editorial Board:

Mykola Vasylenko – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor at the Department of Cybersecurity, National University «Odesa Law Academy»; **Ivan Horbov** – PhD in Engineering, Senior Research Associate, Senior Research Fellow, Institute for Information Recording of NAS of Ukraine; **Andrii Dudnik** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Networking and Internet Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Serhii Yevseiev** – Doctor of Engineering, laureate of the 2024 National Prize of Ukraine named after Borys Paton, Professor at the Department of Cybersecurity, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; **Serhii Zybin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering, National Aviation University; **Serhii Kavun** – Doctor of Economics, PhD in Engineering, Professor, Head of the Department of Computer Information Systems and Technologies Interregional Academy of Personnel Management; **Larysa Komarova** – Doctor of Engineering, Senior Research Scientist, Laureate of State Prize, Director of Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Tetiana Okhrimenko** – PhD in Engineering, Senior Research Scientist at the Scientific Research Laboratory for Countering Aviation Cyberthreats, National Aviation University; **Mykola Rudnichenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Ruslan Skuratovskyi** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Computational Mathematics and Computer Modeling, Interregional Academy of Personnel Management; **Olha Suprun** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Software Systems and Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Halyna Tabunshchyk** – PhD in Engineering, Professor, Professor at the Department of Software Tools, “Zaporizhzhia Polytechnic” National university; **Oleksandr Fomin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Computerized Control Systems, Professor at the Department of Applied Mathematics and Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Yuliia Khokhlachova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technology Security, National Aviation University; **Olha Cholyshkina** – PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Intellectual Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Oleksii Chorny** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Electrical Engineering and Information Technologies, Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskyi; **Oleksandr Yudin** – Doctor of Engineering, Professor, Director of the Cybersecurity Center of the Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Hopeienko Viktor** – dr. sc. ing., Professor, Vice Rector for Research, Director of the study programme “Computer systems”, ISMA University of Applied Sciences (Republic of Latvia); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., Profesor, Katedra Informatyki w Zarządzaniu, Politechnika Gdańska (Republic of Poland).

Registration of Print media entity:

*Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine: Decision No. 1173 as of 11.04.2024.
Media ID: R30-03890*

Media entity – Private Joint-Stock Company «Higher education institution «Interregional Academy of Personnel Management» (03039, Kyiv, Frometivska str., 2, iapm@iapm.edu.ua, tel. (044) 490-95-00).

*Language of publication: Ukrainian, English, German, French, and Polish.
Periodicity: 4 times a year.*

According to the Decree of MES No. 1290 (Annex 3) dated November 30, 2021, the journal was included in the List of scientific professional publications of Ukraine (category B) in specialties F2 – Software Engineering; F3 – Computer Sciences; F4 – Systems Analysis and Data Science; F5 – Cybersecurity and Data Protection; F6 – Information Systems and Technologies; F7 – Computer Engineering.

All electronic versions of articles in the collection are available on the official website edition
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

The articles were checked for plagiarism using the software
StrikePlagiarism.com developed by the Polish company Plagiat.pl.

ЗМІСТ

Олександр АРТАМОНОВ, Михайло ЛУЧКЕВИЧ ФОРМАЛІЗАЦІЯ ВИМОГ ДО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ У ЗАДАЧАХ ОПТИМІЗАЦІЇ ХМАРНИХ РЕСУРСІВ.....	8
Микола БІЛИЙ, Євген КРИЛОВ МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ RECIPROCAL RANK FUSION ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ГІБРИДНОГО ПОШУКУ У ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З ВЕКТОРНИМИ БАЗАМИ ДАНИХ.....	14
Олег ГАРАСИМЧУК, Михайло ЛУЧКЕВИЧ ПІДХОДИ DESIGN SCIENCE RESEARCH ДО ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРАКТ-ТЕСТУВАННЯ	20
Mykhailo HNATYSHYN, Oleksii NEDASHKIVSKIY A FRAMEWORK FOR EXPLAINABLE AI (XAI) IN MACHINE LEARNING-BASED FAKE NEWS DETECTION SYSTEMS: ENHANCING TRANSPARENCY, TRUST, AND USER AGENCY.....	24
Галина ГРИГОРЧУК, Любомир ГРИГОРЧУК, Вікторія БАНДУРА АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕГУЛЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПІД ЧАС ОСУШУВАННЯ УТФЕЛЮ.....	30
Олег ЖВАЛІК ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЦІЇ ІТ В УПРАВЛІННІ СОНЯЧНОЮ ЕНЕРГЕТИКОЮ.....	39
Олександр ЗАДЕРЕЙКО, Світлана ЄЛЕНИЧ, Наталія ЛОГІНОВА, Олена ТРОФИМЕНКО, Володимир ГУРА АНАЛІЗ РЕЛЕВАНТНОСТІ ПОШУКОВОЇ ВИДАЧІ НАУКОМЕТРИЧНИХ БАЗ ДАНИХ	47
Володимир КАРАБЧУК МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ ТА БОРОТЬБИ З ДЕЗІНФОРМАЦІЄЮ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	56
Юрій КІШ, Ігор ЛЯХ ЕВОЛЮЦІЯ ПОНЯТЬ РИЗИКУ ТА ЇХ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ЯКОСТІ ІТ-ПРОДУКТІВ.....	62
Євгеній КЛИМЕНКО, Олена ГЛАЗУНОВА АРХІТЕКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОСВІТНЬОЇ АНАЛІТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ.....	69
Андрій КОБИЛЮК ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ХМАРНИМИ РЕСУРСАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗПОДІЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ	76
Artem KOLOMYTSEV, Yuliia KUZNETSOVA THE ROLE OF MLOPS IN ADVANCING GREEN ENERGY: AN EVALUATION OF TECHNOLOGIES AND PRACTICES.....	83
Євген ЛАНСЬКИХ, Олексій НАУМОВ СУЧАСНІ МЕТОДИ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО МАРКУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ: КЛАСИФІКАЦІЯ, АНАЛІЗ І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ	89
Єлизавета ЛИТЮГА, Валерій ЯЦЕНКО РОЗРОБКА TELEGRAM-БОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБЛІКУ КРИПТОТРАНЗАКЦІЙ.....	96
Юрій ЛУК'ЯНЧУК, Лев БОЙКО ІННОВАЦІЙНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ МОРАЛЬНО-ЕТИЧНИХ ЦІННОСТЕЙ ПІДЛІТКІВ У ЦИФРОВУ ЕПОХУ	103
Ігор МАРТИНЮК, Альона ДЕСЯТКО ЗАГРОЗА АТАКИ 51 % ДЛЯ НИЗЬКОХЕШРЕЙТОВИХ ЦИФРОВИХ ВАЛЮТ	110
Ігнат МИРОШНИЧЕНКО ІНТЕГРОВАНІ НАВІГАЦІЙНІ ТА КОМУНІКАЦІЙНІ ПРОТОКОЛИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ: АРХІТЕКТУРИ, МОДЕЛІ ТА ВИКЛИКИ РЕАЛІЗАЦІЇ В ДИНАМІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ	116

Костянтин МІНКОВ ВИКОРИСТАННЯ ACTIVE LEARNING ЯК ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ УТОЧНЕННЯ МІТОК У ЗАДАЧАХ, ЗАСНОВАНИХ НА ПРИНЦИПАХ СЛАБКОГО НАВЧАННЯ	123
Артем МОІСЕЄНКО, Юлія КУЗНЕЦОВА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НАВЧАННЯМ	130
Борис ПАНАСЮК, Наталя БАБЮК КОНТРАКТНО-ОРІЄНТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСЕРВІСНОЇ АРХІТЕКТУРИ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ СИСТЕМ У UML-ПОДІБНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	136
Олексій ПІСКАРЬОВ, Данило АБРАМОВИЧ, Владіслав ПЛУГІН ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖ ТА ГІБРИДНИХ СХОВИЩ ПРИ СТВОРЕННІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ	141
Денис ПОКИДЬКО, Олена СКЛЯРЕНКО АЛГОРИТМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ МАНІПУЛЯЦІЯМ У ГЕЙМІФІКОВАНИХ ОСВІТНІХ СЕРЕДОВИЩАХ	150
Олександр ПОПОВ, Валерія КОВАЧ, Євген ПИЛИПЧУК, Євгенія КОЧЕЛАБ, Володимир АРТЕМЧУК, Теодозія ЯЦИШИН, Володимир КУЦЕНКО ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ ГІБРИДНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ БІОПОЛІМЕРІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	157
Олексій РИХАЛЬСЬКИЙ АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ СЕМАНТИЧНОГО УЗГОДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ.....	166
Inna ROZLOMII, Serhii NAUMENKO, Volodymyr SYMONYUK, Vitalii PTASHENCHUK, Vitalii ZAZHOMA SIMPLIFIED CRYPTOGRAPHY FOR SECURE VIBRATION PARAMETERS IN POST-PROCESSING OF 3D-PRINTED PARTS.....	175
Oleh SYPIAHIN, Dmytro POLTAVSKYI, Roman MARTYENKO EXPLORING THE ADVANTAGES AND LIMITATIONS OF THE FEATURE-SLICED DESIGN ARCHITECTURAL METHODOLOGY IN COMMERCIAL FRONTEND PROJECTS	183
Khrystyna TERLETSKA ENHANCING REAL-TIME DATA REPLICATION EFFICIENCY THROUGH OPTIMIZATION OF CHANGE DATA CAPTURE METHODS.....	188
Данило ТРОЩИЙ, Юлія КУЗНЕЦОВА ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АСПЕКТІВ ПОВТОРЮВАНOSTІ РУТИННИХ ЗАВДАНЬ У ПРОЦЕСІ РОЗРОБЛЕННЯ МОБІЛЬНИХ ДОДАТКІВ.....	195
Tamara FRANCHUK, Dmytro TYSHCHENKO, Alona DESIATKO, Dmytro HNATCHENKO ASSESSMENT OF THE USE OF CLOUD TECHNOLOGIES IN ACCOUNTING AS AN INNOVATIVE TOOL.....	200
Олексій ХОНІН, Олена СКЛЯРЕНКО АЛГОРИТМИ ОПТИМАЛЬНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ СЛУЖБ ЕКСТРЕНИХ РЕАГУВАНЬ.....	206
Maksym CHEREMNOV TRANSFORMATION OF INTERNATIONAL CYBERSECURITY STANDARDS AS A RESPONSE TO TECHNOLOGICAL AND GEOPOLITICAL CHALLENGES.....	211
Sofiia SHVETS INTEGRATION OF LARGE LANGUAGE MODELS INTO CHATBOT-BASED CUSTOMER CALL PROCESSING SYSTEMS	216

УДК 504.3.054

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.2.23>

Олександр ПОПОВ

доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, професор кафедри комп'ютерних інформаційних систем і технологій, ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія управління персоналом», sasha.porov1982@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5065-3822

Валерія КОВАЧ

доктор наук з державного управління, професор, провідний науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, професор кафедри публічного адміністрування, ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія управління персоналом», valeriiakovach@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1014-8979

Євген ПИЛИПЧУК

кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, Pylypchuk.E@nas.gov.ua

ORCID: 0000-0001-5467-2839

Євгенія КОЧЕЛАБ

кандидат фізико-математичних наук, учений секретар, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, evk28@outlook.com

ORCID: 0009-0009-8354-8795

Володимир АРТЕМЧУК

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з науково-організаційної роботи, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, старший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, ArtemchukVO@nas.gov.ua

ORCID: 0000-0001-8819-4564

Теодозія ЯЦИШИН

доктор технічних наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, старший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, t.yatsyshyn@nung.edu.ua

ORCID: 0000-0001-5508-7017

Володимир КУЦЕНКО

молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, kuts.vo@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0577-2056

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ ГІБРИДНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ БІОПОЛІМЕРІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Анотація. У статті розглядається проблема створення екологічно безпечних та радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів для використання в умовах дії іонізуючого випромінювання. Актуальність дослідження зумовлена недоліками традиційних екранувальних матеріалів, зокрема їхньою токсичністю, складністю утилізації та обмеженою ефективністю проти різних типів випромінювання.

Метою статті є розроблення концептуальної схеми та алгоритму створення екологічно безпечних, радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів для використання в радіаційних технологіях різного призначення.

Методологія. Методологічну основу дослідження становить поетапний комплексний підхід, що включає: відбір природних полімерів із високим потенціалом радіаційної стійкості (зокрема лігніну); їх хімічну модифікацію для

© О. Попов, В. Ковач, Є. Пилипчук, Є. Кочелаб, В. Артемчук, Т. Яцишин, В. Куценко, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

покращення міжфазної взаємодії з неорганічними компонентами; впровадження наноповнювачів оксидів металів із радіаційно-захисними властивостями; синтез гібридних матеріалів за контрольованих технологічних умов. Для характеристики структури, морфології, термостійкості та функціональних властивостей матеріалів запропоновано використовувати комплекс аналітичних методів: FTIR-спектроскопію, сканувальну електронну мікроскопію (SEM), рентгеноструктурний аналіз (XRD), термогравіметричний аналіз (TGA) та механічні випробування до і після дії іонізуючого випромінювання.

Наукова новизна. Уперше запропоновано алгоритм створення гібридних матеріалів на основі природних полімерів з урахуванням екологічної безпечності, біосумісності та здатності до нейтралізації шкідливих побічних ефектів радіаційного впливу (вторинних електронів, радикалів).

Висновок. У статті обґрунтовано доцільність створення екологічно безпечних та радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів як альтернативи традиційним екранувальним засобам. Розроблено концептуальну схему й алгоритм синтезу таких матеріалів, що охоплює вибір базового біополімеру, його модифікацію, інтеграцію неорганічних наноконпонентів і подальше тестування готового композиту. Обґрунтовано ефективність використання лігніну завдяки його радіаційній стійкості та антиоксидантним властивостям. Запропоновано підходи до введення оксидів металів для нейтралізації вторинних електронів і радикалів, що забезпечує багаторівневий захист від іонізуючого випромінювання.

Ключові слова: біополімери, радіаційно стійкі матеріали, наноконкомпозити, іонізуюче випромінювання.

Oleksandr POPOV, Valeriia KOVACH, Ievhen PYLYPCHUK, Yevheniia KOCHELAB, Volodymyr ARTEMCHUK, Teodoziia YATSYSHYN, Volodymyr KUTSENKO. INNOVATIVE APPROACHES TO CREATING HYBRID MATERIALS BASED ON BIOPOLYMERS FOR PROTECTION AGAINST IONISING RADIATION

Abstract. The article discusses the problem of creating environmentally safe and radiation-resistant hybrid materials based on natural polymers for use in conditions of ionising radiation. The relevance of the research is substantiated by the shortcomings of traditional shielding materials. It considers their toxicity, complexity of disposal and limited effectiveness against various types of radiation.

The aim of the article is to develop a conceptual scheme and algorithm for the creation of environmentally safe, radiation-resistant hybrid materials based on natural polymers for use in radiation technologies for various purposes.

Methodology. The methodological basis of the study is a phased comprehensive approach, which includes: selection of natural polymers with high radiation resistance potential (in particular lignin); their chemical modification to improve interphase interaction with inorganic components; introduction of metal oxide nanofillers with radiation-protective properties; synthesis of hybrid materials under controlled technological conditions. It is proposed to use a set of analytical methods to characterize the structure, morphology, thermal stability and functional properties of materials: FTIR spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA) and mechanical testing before and after exposure to ionising radiation.

Scientific novelty. For the first time, an algorithm for creating hybrid materials based on natural polymers was proposed, taking into account environmental safety, biocompatibility and the ability to neutralize the harmful side effects of radiation exposure (secondary electrons, radicals).

Conclusion. The article substantiates the feasibility of creating environmentally safe and radiation-resistant hybrid materials based on natural polymers as an alternative to traditional shielding agents. A conceptual scheme and algorithm for the synthesis of such materials was developed, covering the selection of the base biopolymer, its modification, the integration of inorganic nanocomponents, and further testing of the finished composite. The effectiveness of using lignin is justified due to its radiation resistance and antioxidant properties. Approaches to the introduction of metal oxides for the neutralization of secondary electrons and radicals were proposed, providing multi-level protection against ionizing radiation.

Key words: biopolymers, radiation-resistant materials, nanocomposites, ionising radiations.

Актуальність проблеми. Радіаційні технології широко впроваджуються у різних сферах діяльності, зокрема в медицині, ядерній енергетиці, харчовій промисловості та сільському господарстві. Водночас їхнє застосування зумовлює необхідність ефективного забезпечення захисту від іонізуючого випромінювання, вплив якого на біологічні об'єкти може спричинити серйозні патологічні зміни. До таких наслідків належать термічні ураження (опіки), гостра променева хвороба, летальні ускладнення при високих дозах, а також розвиток онкологічних захворювань, новоутворень та генетичних мутацій при тривалому або хронічному опроміненні низькими дозами [2].

На сьогоднішній день для захисту від радіаційного випромінювання різних джерел переважно використовуються екранувальні матеріали на основі поліетилену, парафіну, бетону, скла, важких металів та їх оксидів. Водночас застосування таких матеріалів супроводжується низкою екологічних проблем, зокрема складністю їх утилізації та токсичністю, що становить загрозу для здоров'я людини (наприклад, свинець є високотоксичним елементом). У зв'язку з цим у багатьох країнах світу активно ведуться наукові дослідження, спрямовані на створення полімерних матричних композитів, здатних забезпечувати ефективний радіаційний захист у різних секторах народного господарства, таких як медицина, ядерна енергетика, харчова промисловість, сільське господарство тощо [3; 4; 7; 10]. При цьому основна увага зосереджується переважно на підвищенні радіаційно-захисних характеристик зазначених матеріалів, тоді як питання їх екологічної безпечності у контексті експлуатації та утилізації залишаються

недостатньо дослідженими. Крім того, більшість сучасних полімерних нанокомпозитів забезпечують ефективний захист переважно від одного виду іонізуючого випромінювання, демонструючи низьку ефективність за умов одночасного впливу декількох його видів.

Застосування вищезазначених матеріалів в радіаційному захисті та радіаційних технологіях не відповідає сучасним екологічним вимогам, зокрема тенденціям у боротьбі зі зміною клімату. Сучасні екологічні тренди вимагають використання безпечних речовин та екологічно чистих матеріалів, тобто таких, що є біосумісними та здійснюють мінімальний вплив на навколишнє природне середовище при використанні та утилізації [5; 9]. У зв'язку з цим, актуальною науковою проблемою є розроблення біополімерних гібридів, які б відповідали сучасним вимогам безпеки, нетоксичності, радіаційної стійкості і могли забезпечити необхідний рівень захисту одночасно від різних видів іонізуючого випромінювання. Одним із ключових напрямів дослідження є розроблення концептуальної схеми та алгоритму створення радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів.

Метою статті є розроблення концептуальної схеми та алгоритму створення екологічно безпечних, радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів для використання в радіаційних технологіях різного призначення.

Виклад основного матеріалу

Концептуальна схема створення матеріалів.

Концептуальна схема створення радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів передбачає поетапний підхід до їх створення. Цей підхід складається з кроків, що враховують підбір оптимального за властивостями природного полімеру, його модифікацію, інтеграцію наповнювачів, характеристизацію та тестування (рис. 1).

Далі розглянемо ці кроки (етапи) більш детально.

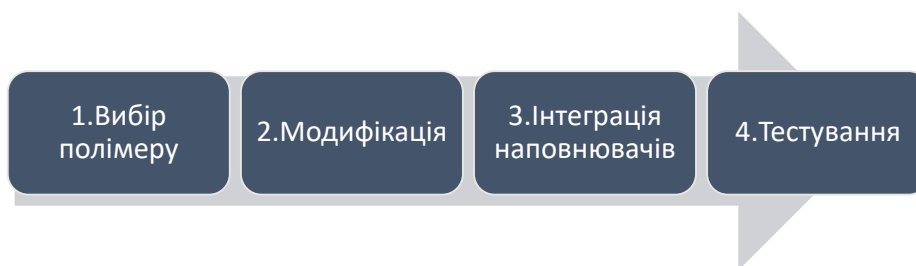


Рис. 1. Концептуальна схема створення матеріалів

Етап 1. Вибір базового природного полімеру

Для створення гібридних радіаційно стійких матеріалів важливо обрати базовий природний полімер, який слугуватиме основою для подальшої модифікації. Полімери мають різні структурні особливості, які визначають їхню механічну міцність, термостабільність, хімічну реактивність та сумісність з іншими компонентами.

Для пошуку найкращого полімеру варто здійснити наступні кроки:

1. Аналіз властивостей різних природних полімерів (целюлоза, хітозан, альгінати тощо).
2. Вибір полімеру з оптимальними властивостями для подальшої модифікації (за необхідності).

Аналіз літературних джерел [6; 8] показав, що лігнін, як один із ключових компонентів рослинної біомаси, демонструє високий рівень стійкості до різних видів радіаційного впливу, включаючи опромінення електронним променем та γ -променями. Його унікальна здатність зберігати структурну цілісність і навіть покращувати деякі функціональні властивості під впливом випромінювання відкриває перспективи для широкого використання в полімерних композитах, біоматеріалах та інших інженерних рішеннях.

Лігнін демонструє виняткову радіаційну стабільність порівняно з природними та синтетичними полімерами, що робить його надзвичайно перспективним матеріалом для радіаційно стійких матеріалів. У той час як багато полімерів зазнають значної деградації під впливом опромінення – особливо за низьких доз і в присутності кисню – лігнін зберігає свою структурну цілісність із мінімальними змінами (рис. 2).

Таким чином, покриття на основі лігніну є перспективним рішенням для застосувань, які потребують тривалої радіаційної стабільності в окислювальних середовищах, і значно перевершують за цими параметрами традиційні матеріали в аналогічних умовах.

В таблиці 1 наведено аналіз ключових конструкційних особливостей та переваг деяких вибраних природних полімерів, що дозволяє обрати оптимальний матеріал для конкретних завдань.

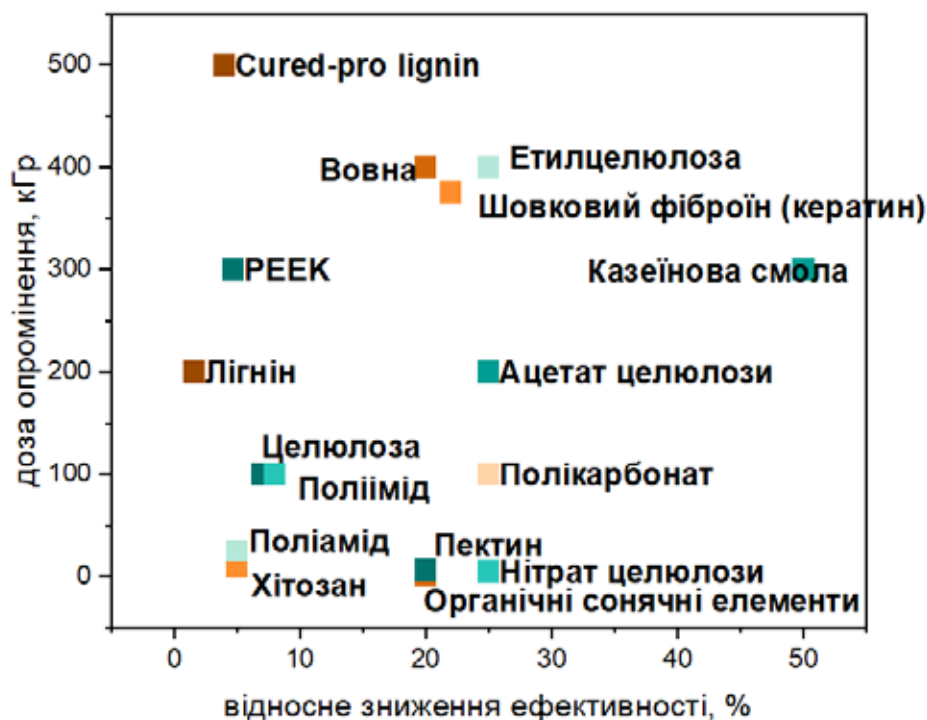


Рис. 2. Зміна властивостей різних матеріалів після впливу радіації

Таблиця 1

Конструкційні особливості та потенційні переваги вибраних природних полімерів

Природний полімер	Особливості хімічної структури	Потенційні переваги
Целюлоза	- Лінійна структура з високою кристалічністю. - Стабільні β-1,4-глікозидні зв'язки між мономерами глюкози. - Висока міцність і жорсткість.	- Міцність на розтяг. - Стійкість до термічного впливу. - Здатність до біологічного розкладу. - Легкість модифікації.
Хітозан	- Аміногрупи у структурі, які забезпечують високу реакційну здатність. - Полімер на основі хітину (продукт деацетилювання). - Часткова кристалічність.	- Біосумісність. - Антимікробні властивості. - Здатність утворювати хімічні зв'язки з неорганічними компонентами. - Легкість модифікації.
Альгірати	- Поліаніони, що складаються з мономерів альгінової кислоти. - Утворюють міцні гелі у присутності катіонів (Ca^{2+}). - Висока гідрофільність.	- Формування гідрогелів. - Легкість модифікації. - Біосумісність. - Стійкість до розтягування в гелевому стані.
Колаген	- Трикутна гвинтова структура. - Складається з амінокислот (переважно гліцину, проліну, гідроксипроліну). - Висока здатність до зшивання та стабілізації.	- Висока міцність на стиск- Біосумісність. - Здатність утримувати воду. - Відмінна адгезія до інших матеріалів.
Лігнін	- Комплексна ароматична структура. - Сітчаста (некристалічна) будова. - Високий вміст π-електронних систем.	- Радіаційна стійкість. - Антиоксидантні властивості. - Можливість утворювати композити з іншими полімерами. - Екологічність.
Кератин	- Висока кількість дисульфідних зв'язків. - Висока еластичність та здатність до утворення волокон.	- Термостійкість. - Еластичність. - Здатність до хімічної модифікації.
Пектин	- Полімер галактуранової кислоти. - Часто містить метильовані та ацетильовані групи. - Висока гідрофільність.	- Формування гідрогелів- Біосумісність. - Стійкість до хімічної модифікації.

Етап 2. Модифікація полімеру

Хімічна або фізична модифікація природного полімеру в деяких випадках є необхідною для покращення експлуатаційних властивостей матеріалу, підвищення його сумісності з наповнювачем тощо. В якості прикладу можна привести хімічну модифікацію полімеру для підвищення стійкості до радіації (наприклад, хімічна зшивка). Крім того, часто важливим фактором є введення функціональних груп, що можуть взаємодіяти з неорганічними компонентами.

Модифікація природних полімерів є важливим етапом у створенні радіаційно стійких матеріалів. Хімічні зміни структури полімеру, такі як зшивка або введення функціональних груп, дозволяють значно покращити його механічну міцність, стабільність до радіаційного впливу та здатність до взаємодії з неорганічними компонентами.

Варто зазначити, що модифікація полімеру не є обов'язковою, і застосовується тільки у випадку виявлення та потреби внесенні змін до незадовільних властивостей виявлених на Етапі 1.

Етап 3. Інтеграція наповнюючих (неорганічних) компонентів

Однією з ключових проблем під час створення радіаційно стійких матеріалів є нейтралізація вторинних електронів і вільних радикалів, які утворюються під впливом радіації. Ці частинки здатні спричинити розрив хімічних зв'язків у полімерних матрицях, що призводить до деградації та втрати функціональних властивостей матеріалів. Для мінімізації цього ефекту до складу матеріалу впроваджують наповнюючі компоненти, здатні ефективно поглинати або розсіювати енергію вторинних електронів.

Також важливо забезпечити матеріал радіаційно стійкою оболонкою товщиною декілька мікрон, виготовленою з матеріалу що запобігає поширенню вторинних електронів та нейтралізує вільні радикали. Утворення вторинних електронів може спричинити розрив хімічних зв'язків в мікрометровому масштабі, і саме тому важливо «нейтралізувати» так вторинні електрони.

На даному етапі важливо забезпечити вибір радіаційно стійких неорганічних наповнювачів (наприклад, наночастинки оксидів металів) та розробку методик введення наповнювачів у полімерну матрицю.

Фактори, які впливають на вибір методики введення наповнювача:

1. Тип полімерної матриці: термопласти або термореактивні полімери.
2. Розмір і тип наповнювача: макро-, мікро- чи наночастинки.
3. Кінцеві властивості матеріалу: механічна міцність, термостабільність, стійкість до радіації.
4. Технологічна доступність: наявність обладнання та економічна доцільність.

Розробка методик введення наповнювачів у полімерну матрицю є важливим етапом створення гібридних матеріалів. Оптимальний розподіл і взаємодія між полімерною матрицею та наповнювачем впливають на фізико-механічні властивості, стабільність і функціональність кінцевого матеріалу. Нижче наведено схему розподілу неорганічного наповнювача в полімерній матриці, яка демонструє взаємодію між біополімером та наповнювачем (рис. 3). Для покращення механічних і функціональних властивостей матеріалу використовуються модифіковані поверхні полімеру, що забезпечують ефективну міжфазову взаємодію з наповнювачем. Такий підхід сприяє рівномірному розподілу наповнювача та оптимізації властивостей композитного матеріалу.

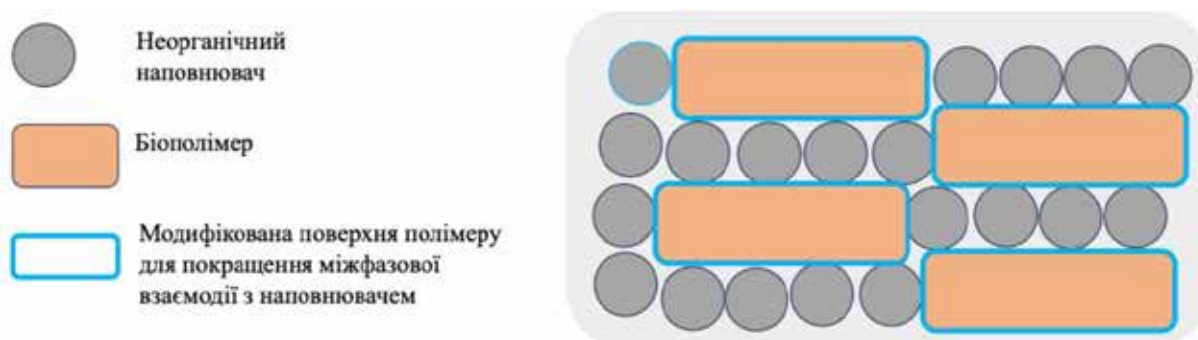


Рис. 3. Схема розподілу неорганічного наповнювача в полімерній матриці

Етап 4. Синтез гібридного матеріалу

Оптимізація умов синтезу:

Температура: Контроль температури має бути точним, оскільки високі температури можуть призводити до деградації природних полімерів. Рекомендовано використовувати температури нижче

температури розкладу полімеру, але достатньо високі для активації реакцій (наприклад, 60–80°C для хітозану або лігніну).

Час: Потрібно знайти баланс між достатнім часом для завершення реакції та уникненням тривалого впливу, який може спричинити небажані побічні реакції (наприклад, гель-утворення або структурні дефекти).

Концентрація реагентів: Варто враховувати, що надлишок реагентів може викликати побічні реакції, зокрема неконтрольоване зшивання. Тому концентрацію потрібно ретельно оптимізувати через попередні експерименти.

Рівномірний розподіл неорганічних компонентів:

Використання ультразвукової обробки або високошвидкісного змішування може допомогти забезпечити рівномірність.

Етап 5. Характеризація та тестування

Фізико-хімічні аналізи отриманого матеріалу: **FTIR (ІЧ-спектроскопія)** для підтвердження утворення хімічних зв'язків. **SEM/TEM (електронна мікроскопія)** для візуалізації розподілу компонентів. **TGA/DSC (термічні методи)** для оцінки термостійкості. **XRD (рентгенівська дифракція)** для визначення кристалічної структури. Важливо також оцінити **адгезію** між матрицею та неорганічними компонентами.

Тестування радіаційної стійкості та механічних властивостей:

Для радіаційної стійкості рекомендовано тестувати матеріал при різних дозах та в різних умовах (з повітрям/без повітря) і оцінювати такі параметри:

- Структурні зміни (FTIR, TGA).
- Утворення вторинних радикалів (ЕПР-спектроскопія).
- Зміна механічних властивостей (міцність на розтяг, ударна в'язкість).

Механічні випробування:

- Важливо оцінити зміну модулів Юнга, межі текучості та міцності після радіаційного опромінення.
- Використання динамічних методів (наприклад, DMA) дозволяє отримати додаткову інформацію про поведінку матеріалу в умовах експлуатації.

Алгоритм створення радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів.

Розробка радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів є актуальним напрямом сучасного матеріалознавства, особливо для застосувань у космічній техніці, ядерній енергетиці та медицині.

Загальний опис ключових етапів:

Етап 1–2: Глибокий аналіз та вибір матеріалів є критичними для забезпечення бажаних властивостей кінцевого продукту.

Етап 3–5: Модифікація та синтез вимагають точного контролю хімічних процесів для досягнення стабільної гібридної структури.

Етап 6–7: Формування та характеризація матеріалу дозволяють оцінити його придатність для практичного застосування.

Етап 8–9: Тестування радіаційної стійкості та подальша оптимізація забезпечують відповідність матеріалу вимогам експлуатації в екстремальних умовах.

Етап 10: Масштабування процесу та впровадження на ринок є завершальними кроками для реалізації проекту.

Запропонована концептуальна схема та алгоритм створення таких матеріалів включають наступні етапи:

Постановка мети та завдань:

- Визначення специфічних вимог до матеріалу, таких як радіаційна стійкість, механічна міцність, термостабільність та біосумісність.
- Ідентифікація потенційних сфер застосування, включаючи космічну техніку, ядерну енергетику та медицину.

Вибір базового природного полімеру:

- Аналіз доступних полімерів, таких як целюлоза, хітозан, колаген, альгінати та кератин.
- Оцінка їхніх механічних, термічних, хімічних та радіаційних властивостей.
- Вибір оптимального полімеру на основі встановлених вимог до кінцевого матеріалу.

Модифікація природного полімеру:

- Хімічна модифікація, включаючи крос-зв'язування, ацилювання та етерифікацію, для підвищення стійкості до радіації.
- Введення функціональних груп для покращення взаємодії з неорганічними компонентами.

Вибір неорганічних компонентів:

– Ідентифікація радіаційно стійких матеріалів, таких як оксиди металів (наприклад, TiO_2 , Al_2O_3), наночастинки графену та керамічні наповнювачі.

– Оцінка їхньої сумісності з модифікованим полімером.

– Визначення оптимальної концентрації та розміру частинок.

Розробка методики синтезу гібридного матеріалу:

– Вибір методу синтезу, такого як сол-гел процес, ін-ситу полімеризація або механічне змішування.

– Оптимізація параметрів процесу, включаючи температуру, час реакції та pH середовища.

– Забезпечення рівномірного розподілу неорганічних компонентів у полімерній матриці.

Формування матеріалу:

– Застосування технологій формування, таких як лиття, екструзія або 3D-друк.

– Контроль морфології, включаючи пористість, товщину та однорідність структури.

– Проведення пост-обробки, такої як термічна обробка, відпал або сушка.

Характеризація отриманого матеріалу:

– Структурний аналіз за допомогою методів, таких як рентгенівська дифракція (XRD), інфрачервона спектроскопія (FTIR) та скануюча електронна мікроскопія (SEM).

– Вимірювання фізико-механічних властивостей, включаючи міцність на розрив, еластичність та твердість.

– Оцінка термостабільності за допомогою термогравіметричного аналізу (TGA) та диференціального термічного аналізу (DTA).

Тестування радіаційної стійкості:

– Опромінення зразків при різних дозах радіації.

– Аналіз змін фізико-хімічних та механічних властивостей після опромінення.

– Визначення механізмів деградації та стабільності матеріалу.

Оптимізація складу та технології:

– Аналіз отриманих даних для визначення кореляції між складом, структурою та властивостями.

– Коригування рецептури та умов синтезу для досягнення оптимальних характеристик.

– Повторне тестування для підтвердження поліпшень.

Масштабування та впровадження:

– Розробка технологічного процесу для промислового виробництва.

– Оцінка економічної ефективності та екологічних аспектів.

– Підготовка до комерціалізації, включаючи патентування та сертифікацію

На (рис. 4) наведено візуалізацію покрокового алгоритму створення радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів. Представлений рисунок ілюструє ключові етапи процесу, починаючи від вибору базового полімеру та його модифікації до тестування матеріалів на радіаційну стійкість. Такий підхід дозволяє систематизувати процес та забезпечити досягнення оптимальних характеристик матеріалів для застосування в умовах підвищеного радіаційного фону [1].

Вищевикладений алгоритм та його підходи потребують *міждисциплінарного підходу*, який об'єднує експертизу хіміків, фізиків, матеріалознавців та інженерів для досягнення оптимальних результатів у створенні гібридних матеріалів. Така співпраця дозволяє забезпечити комплексний аналіз, модифікацію та впровадження нових матеріалів із підвищеною радіаційною стійкістю.

Не менш важливим є врахування *екологічних аспектів* та наслідків використання безпечних методів і матеріалів. Це сприятиме мінімізації негативного впливу на довкілля як під час виробництва, так і під час експлуатації створених матеріалів.

Висновки. Науково обґрунтовано доцільність створення екологічно безпечних та радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів як альтернативи традиційним екранувальним засобам. Сучасні радіаційні технології, які активно застосовуються в ядерній енергетиці, медицині, агропромисловому комплексі та харчовій промисловості, вимагають високоефективного й безпечно-го захисту від іонізуючого випромінювання. При цьому традиційні матеріали, що використовуються для екранування (свинець, бетон, парафін, поліетилен тощо), характеризуються високою токсичністю, складністю утилізації та неспроможністю відповідати екологічним стандартам, прийнятим у контексті стратегії сталого розвитку та зменшення антропогенного впливу. У роботі доведено, що використання природних полімерів, зокрема лігніну, як основи для створення захисних матеріалів є перспективним напрямом, що поєднує ефективність, безпечність і екологічність.

Запропоновано концептуальну схему та алгоритм створення гібридних композитів, що забезпечують багаторівневий захист від іонізуючого випромінювання. Розроблена модель включає поетапний підхід: від вибору природної полімерної основи з високими механічними та хімічними характеристиками

до її модифікації для покращення адгезії та стійкості до опромінення. Наступним критичним етапом є введення неорганічних наповнювачів – наночастинок оксидів металів, які здатні нейтралізувати вторинні електрони та вільні радикали, що утворюються внаслідок впливу іонізуючого випромінювання. Визначено технологічні умови синтезу, що дозволяють досягти стабільності структури композиту, його однорідності та цільових функціональних властивостей. Сформульовано підходи до використання фізико-хімічних методів аналізу (FTIR, SEM, TGA, XRD) та механічних випробувань, які підтверджують ефективність створених матеріалів.

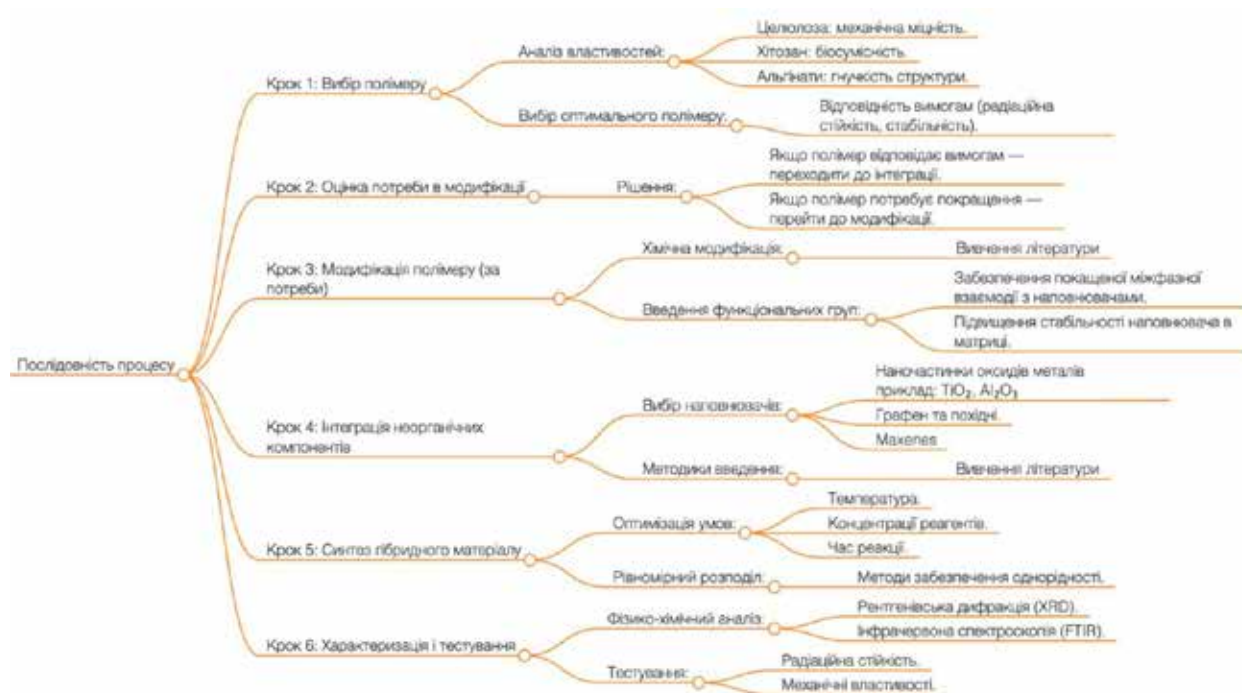


Рис. 4. Візуалізація покрокового алгоритму створення радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів

Результати дослідження відкривають нові можливості для формування міждисциплінарної платформи розроблення матеріалів нового покоління для умов радіаційного навантаження. Запропонована концепція є придатною до адаптації в низці галузей, де необхідний надійний та тривалий захист від іонізуючого випромінювання – зокрема в космічній техніці, медицині (радіотерапія, транспортування радіоізотопів), зберіганні й перевезенні радіоактивних відходів, а також у проектуванні захисних бар'єрів у ядерних об'єктах. Висвітлені у роботі наукові підходи базуються на принципах екологічної безпеки, що особливо важливо в умовах глобального тренду на використання біосумісних і відновлюваних матеріалів. Дослідження закладає основу для подальших розробок у галузі інженерії функціональних біоматеріалів, дозволяючи сформулювати нову стратегію щодо раціонального використання природних полімерів у високотехнологічних захисних системах.

Список використаних джерел:

1. Нові радіаційно стійкі гібридні матеріали на основі природних полімерів. (Етап: Розроблення концепції та алгоритму створення гібридних радіаційно стійких матеріалів на основі природних полімерів). Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України. 2024. № 0224U033588. 86 с.
2. Abu Bakar N. F., Amira Othman S., Amirah Nor Azman N. F., Saqinah Jasrin N. Effect of ionizing radiation towards human health: A review. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 268(1). P. 012005. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/268/1/012005>
3. Chang S., Guo X., Zhang X. Radiation shielding polymer composites: Ray-interaction mechanism, structural design, manufacture and biomedical applications. *Materials & Design*. 2023. Vol. 233. 112253. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112253>
4. Chmielewski A. G. Radiation technologies: The future is today. *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Vol. 213. 111233. URL: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111233>

5. Luo Y.-S., Chen Z., Hsieh N.-H., Lin T.-E. Chemical and biological assessments of environmental mixtures: A review of current trends, advances, and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 432. 128658. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128658>
6. Moreno A., Horizons M. S.-M. Lignin-Based Smart Materials: A Roadmap to Processing and Synthesis for Current and Future Applications. *Materials Horizons*. 2020. Vol. 7(9). P. 2237–2257. URL: <https://doi.org/10.1039/D0MH00798F>
7. Pylypchuk Ie., Kovach V., Iatsyshyn A., Kutsenko V., Taraduda D. Development Boron and Gadolinium-Containing Composite Materials Based on Natural Polymers for Protection Against Neutron Radiation. In: Zaporozhets A. (ed.) *Systems, Decision and Control in Energy V*. Cham: Springer, 2023. P. 527–540. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_28
8. Sarosi O., Sulaeva I., Fitz E., Summerskii I., Bacher M., Potthast A. Lignin Resists High-Intensity Electron Beam Irradiation. *Biomacromolecules*. 2021. Vol. 22. P. 4365–4372. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00926>
9. Vieira Y., et al. A critical review of the current environmental risks posed by the antidiabetic Metformin and the status, advances, and trends in adsorption technologies for its remediation. *Journal of Water Process Engineering*. 2023. Vol. 54. 103943. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103943>
10. Xu C., Xia D., Zhang X., Yao Q., Wang Y., Zhang C. In situ analysis of metallodrugs at the single-cell level based on synchrotron radiation technology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2024. Vol. 171. 117515. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117515>

Дата надходження статті: 30.06.2025

Дата прийняття статті: 08.07.2025

Опубліковано: 23.09.2025