

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.

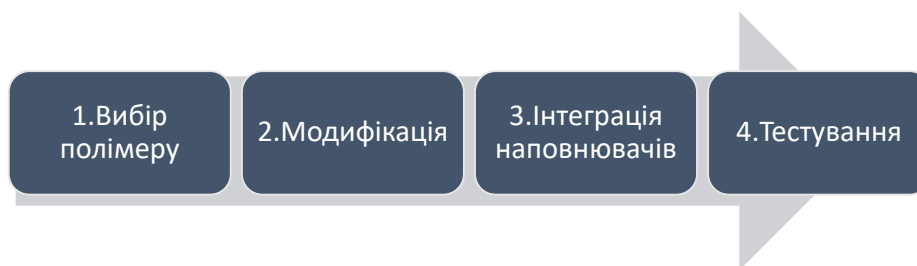


Рис. 1. Концептуальна схема створення матеріалів

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.

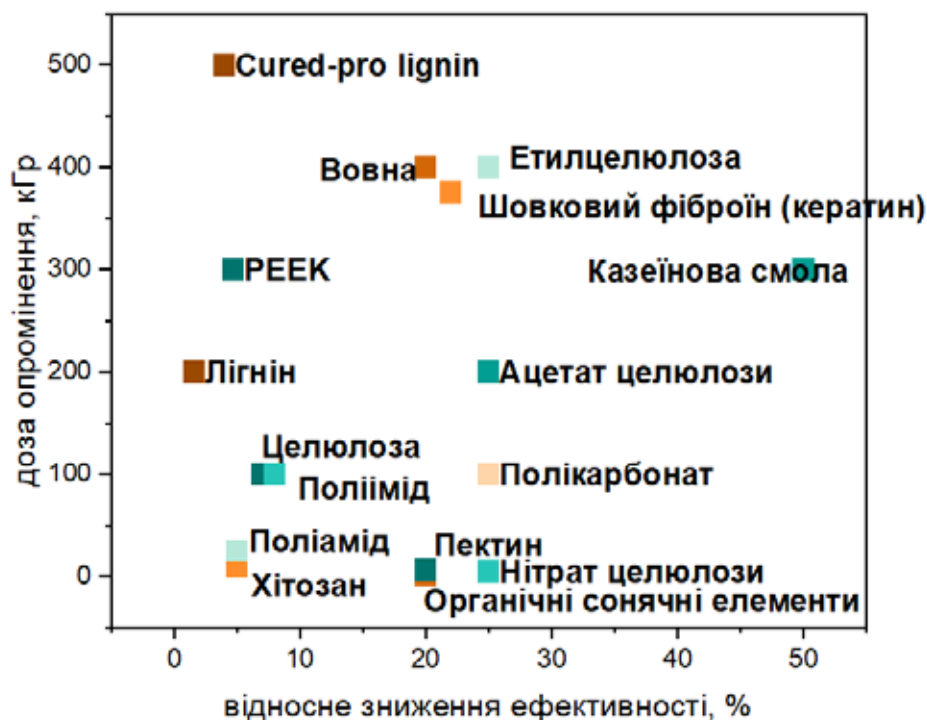


Рис. 2. Зміна властивостей різних матеріалів після впливу радіації

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.

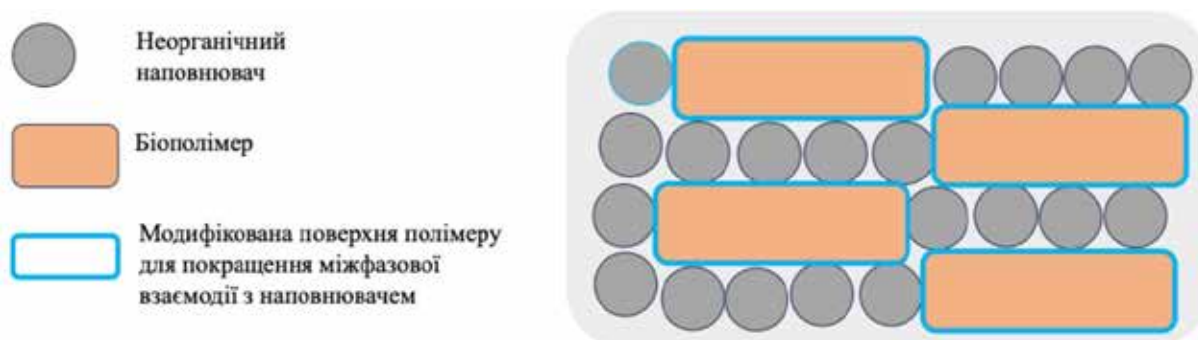


Рис. 3. Схема розподілу неорганічного наповнювача в полімерній матриці

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.

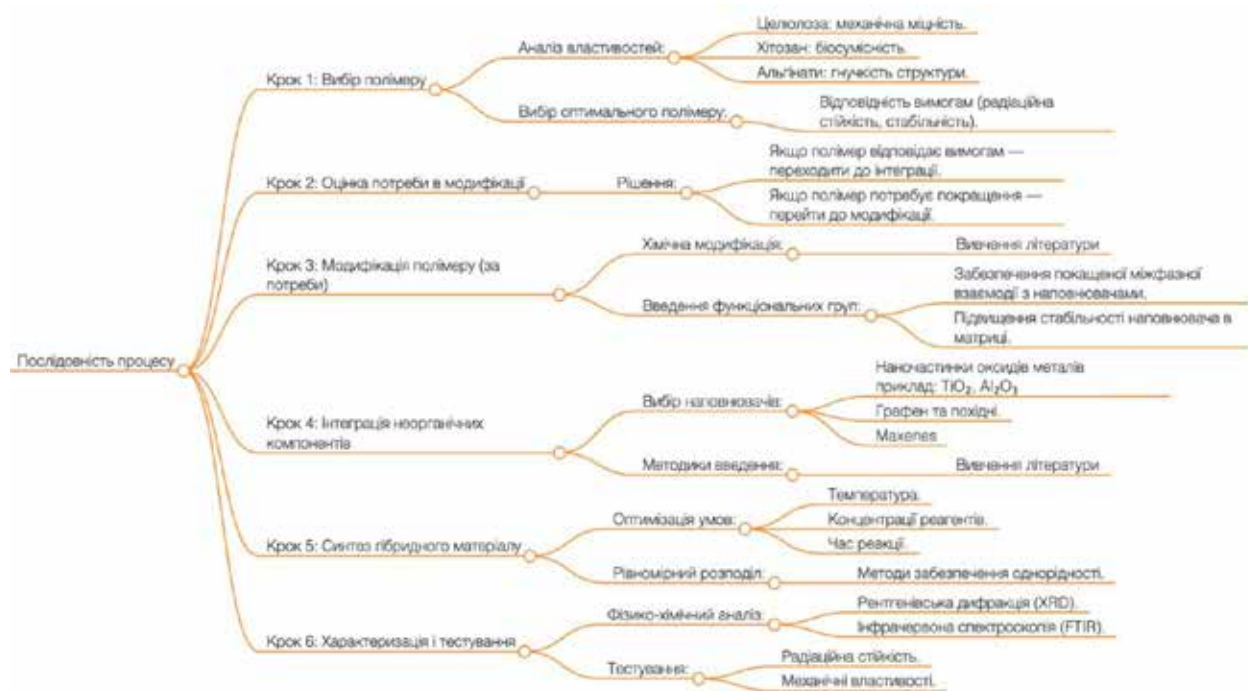


Рис. 4. Візуалізація покрокового алгоритму створення радіаційно стійких гібридних матеріалів на основі природних полімерів

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 сформувати 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