

УДК 620.3:504:620.9(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.146.2.34>

ВИКОРИСТАННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЙ У СТВОРЕННІ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Трус О.М. – к.с.-г.н., доцент,
завідувач кафедри прикладної інженерії та охорони праці,
національний університет
orcid.org/0000-0002-9493-5469

Харитоненко Г.І. – к.б.н., доцент,
доцент кафедри промислової фармації,
Київський національний університет технологій та дизайну
orcid.org/0000-0001-9642-5334

Різак Г.В. – к.фарм.н.,
радник директора Фонду на громадських засадах,
Благодійний фонд підтримки освіти, науки, науково-технічної
orcid.org/0000-0002-0230-2366

Останніми роками спостерігається зростання наукового інтересу до впровадження нанотехнологій у розроблення екологічно безпечних матеріалів. Це має особливе значення для України в контексті економічного відновлення та впровадження європейських стандартів сталого розвитку. Промисловий комплекс України наразі стикається з низкою екологічних проблем, зокрема із забрудненням повітря і води, надмірним споживанням енергії та значними обсягами промислових відходів. Наслідки російської агресії лише посилюють ці виклики, створюючи нові глобальні екологічні проблеми, розв'язання яких потребуватиме тривалого часу.

Одним із найбільш перспективних шляхів розв'язання цих проблем є введення нанотехнологій у промисловість України. Увага досліджень переважно зосереджена на використанні наночасток, наноструктурованих покриттів і композитів для зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище, підвищення виробничої ефективності та забезпечення тривалого терміну експлуатації продукції.

Рівень впровадження нанотехнологій у промисловість України залишається низьким. Головними перешкодами є відсутність комплексної державної стратегії впровадження нанотехнологій, значні витрати на дослідження і промислове виробництво наноматеріалів, недостатня нормативна база екологічної безпеки наноматеріалів, а також обмежена інтеграція науки та виробництва. Такі чинники зумовлюють необхідність системного аналізу можливостей використання нанотехнологій у створенні екологічно безпечних матеріалів для промисловості України.

У статті використано системний підхід, що передбачав аналіз сучасної наукової літератури щодо використання нанотехнологій, вивчення екологічних ефектів від застосування наноматеріалів у промисловості, а також узагальнення даних про стан розвитку нанотехнологій.

Використання наноматеріалів сприяє зменшенню промислових відходів, зниженню рівня шкідливих викидів, підвищенню енергоефективності та довговічності конструкцій. Головними перешкодами для їхнього широкого впровадження залишаються фінансові, нормативно-правові та організаційні чинники.

Ключові слова: наноматеріали, техногенний вплив, екологічні проблеми, екологія людини, хімічні технології.

Trus O.M., Kharytonenko H.I., Rizak G.V. The Use of Nanotechnologies in Developing Environmentally Safe Materials for Ukraine's Industry

In recent years, there has been a growing scientific interest in the application of nanotechnology for the development of environmentally safe materials. This issue is of particular importance for Ukraine in the context of economic recovery and the implementation of European standards for sustainable development. The Ukrainian industrial sector currently faces a number of environmental challenges, including air and water pollution, excessive energy consumption, and significant volumes of industrial waste. The consequences of Russian aggression have only intensified these challenges, creating new global environmental problems that will require a long-term resolution.

One of the most promising pathways to addressing these issues is the integration of nanotechnology into Ukraine's industrial sector. Research in this area has primarily focused on the use of nanoparticles, nanostructured coatings, and composites to reduce the technogenic impact on the environment, improve production efficiency, and extend the service life of industrial products.

The level of nanotechnology adoption in Ukrainian industry, however, remains low. The main obstacles include the absence of a comprehensive national strategy for nanotechnology implementation, high costs associated with research and industrial production of nanomaterials, insufficient regulatory frameworks for environmental safety, and limited integration between science and industry. These factors underscore the necessity of a systematic analysis of the potential for using nanotechnology in the development of environmentally safe industrial materials.

This study employs a systematic approach that involves analyzing current scientific literature on nanotechnology, examining the ecological effects of nanomaterials in industrial applications, and synthesizing available data on the state of nanotechnology development.

The use of nanomaterials contributes to reducing industrial waste, lowering harmful emissions, increasing energy efficiency, and enhancing the durability of structures. Nonetheless, financial, regulatory, and organizational barriers continue to hinder their widespread adoption.

Key words: *nanomaterials, technogenic impact, environmental problems, human ecology, chemical technologies.*

Актуальність теми дослідження. Промисловий комплекс України наразі стикається з низкою екологічних проблем, серед яких забруднення повітря і води, надмірне споживання енергії та значні обсяги промислових відходів. Додатково, наслідки російської агресії посилюють ці виклики, створюючи нові глобальні екологічні проблеми, розв'язання яких потребуватиме тривалого часу. Для переходу до сталого розвитку та зеленої економіки важливо зосередитися на впровадженні технологій, що сприяють економічному зростанню та є екологічно безпечними.

Одним із найбільш перспективних шляхів розв'язання вказаних проблем є впровадження нанотехнологій у промисловість України, що передбачає створення і використання матеріалів, пристроїв і систем зі структурними елементами розміром 1–100 нм [1, с. 10]. Це сприятиме підвищенню енергоефективності, міцності, корозійної стійкості та біосумісності. Окрім того, застосування наноматеріалів покращить якість продукції та зменшить екологічні ризики виробництва [2, с. 300].

Розвиток нанотехнологій відбувається на перетині матеріалознавства, хімії, фізики, математики, електроніки та медицини. Така багатогалузева природа визначає потребу в міждисциплінарних підходах до організації дослідницької та розробницької діяльності [3, с. 107]. Попри значні наукові досягнення провідних науково-дослідних інститутів, зокрема Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Інституту хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України, Інституту фізики НАН України та закладів вищої освіти, рівень впровадження нанотехнологій у промисловість України залишається низьким. Головними перешкодами

є відсутність комплексної державної стратегії впровадження нанотехнологій, значні витрати на дослідження і промислове виробництво наноматеріалів, недостатня нормативна база екологічної безпеки наноматеріалів, а також обмежена інтеграція науки з виробництвом [4, с. 4].

Постановка проблеми. З урахуванням того, що промисловий сектор – одне із найбільших джерел техногенного навантаження на довкілля України, застосування новітніх інноваційних нанотехнологій, здатних зменшити негативний вплив промисловості, є актуальним питанням. Проте в Україні рівень їх впровадження залишається недостатнім через відсутність цілісної державної стратегії, високу вартість виробництва наноматеріалів, недосконалу нормативно-правову базу та слабку інтеграцію науки з виробництвом. Невирішеними залишаються питання оцінки екологічної вигоди застосування наноматеріалів у промисловості України. Недостатньо опрацьовані й механізми інтеграції науки та виробництва, що стримує широке впровадження нанотехнологій у промисловий сектор. Метою дослідження було здійснення аналізу можливостей використання нанотехнологій у створенні екологічно безпечних матеріалів для різних галузей промисловості України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Здійснений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що значна кількість науковців України працює над впровадженням нанотехнологій і створює екологічно безпечні наноматеріали для промисловості України. Зокрема Д. Нікітін наголошує на зростанні наукового інтересу впродовж останніх років до впровадження нанотехнологій у розроблення екологічно безпечних матеріалів [5, с. 94]. У своїй праці Г. Пушкар та О. Пахолок [6, с. 298] стверджують, що це має особливе значення для промисловості України в контексті економічного відновлення та впровадження європейських стандартів сталого розвитку. У дослідженнях Ю. Кравчика [7, с. 449] окреслено використання наночастинок, наноструктурованих покриттів і композитів для зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище, підвищення виробничої ефективності та забезпечення тривалого терміну експлуатації продукції.

Вітчизняні виробники та розробники наноматеріалів значну увагу приділяють очищенню води та стоків. Так, Ю. Забулонов, Т. Мельниченко, В. Кадошніков разом із співавторами [8, с. 62] розробили новий ефективний метод очищення води і стоків для зменшення впливу мікро- та нанопластиків на навколишнє середовище та здоров'я людини. В Україні сформувався МХеpe-кластер (Carbon-Ukraine, MRC), який зосереджує увагу на створенні двовимірних наноматеріалів для використання в системах фільтрації. Окрім того, українські науковці О. Кислова [9, с. 38] та творчий колектив авторів [10, с. 89] з Інституту загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України пропонують використовувати графенові структури і модифіковані цеоліти, що демонструють високу ефективність у вилученні важких металів.

Підприємства будівельної галузі також починають широко використовувати нанотехнології. Зокрема В. Трачевський та О. Файнлейб [11, с. 104] впроваджують домішки на основі нанодисперсного діоксиду кремнію та титану для модифікації цементобетонів. Застосування таких домішок підвищує щільність структури матеріалу, підвищує його стійкість до корозії та впливу агресивних середовищ, що зменшує потребу в додаткових ремонтах і скорочує викиди CO₂. Наукові школи, представниками яких є О. Байбара та М. Радченко [12, с. 34], розглядають феромагнітні нанокompозити, а Л. Мороз [13, с. 47] зосередив свою увагу

на розробленні нових складів наномодифікованих бетонів, що мають покращені властивості в порівнянні зі звичайними.

У машинобудуванні дедалі більше уваги приділяють нанопокриттям, що забезпечують антикорозійний захист, підвищують довговічність деталей і знижують витрати на обслуговування. Так, Р. Яровий і В. Дербаба [14, с. 125] стверджують, що нині з використанням нанотехнологічних підходів розпочато виробництво високоефективних антифрикційних покриттів, що знижують зношування, для автотранспорту. Натомість А. Манохін із колегами [15, с. 77] працюють над виготовленням деталей машин і агрегатів, у яких особлива роль надається конструкційній кераміці, що формується на основі карбїду та нітриду кремнію, оксидів цирконію та алюмінію, нітридів алюмінію, титану, бору, цирконію та деяких інших сполук, і має підвищену міцність, твердість, зносостійкість, температурну та корозійну стійкість.

Ще одним напрямом використання нанотехнологій є створення енергоефективних матеріалів для відновлюваної енергетики. Дослідницькі групи у м. Львів на чолі з Н. Кузиком та С. Куцим [16, с. 165] зосереджують зусилля на формулюванні аналітичних моделей для створення органічних сонячних елементів із багаточисловою архітектурою, зокрема перовскітних сонячних елементів, які потенційно можна виробляти в Україні з урахуванням місцевої сировинної бази.

Не менш важливою є аграрна галузь. Українські науковці І. Дидів, О. Дидів, А. Дидів і М. Юзьків [17, с. 103] розробляють і досліджують нанодобрива та наностимулятори росту рослин, які забезпечують поступове вивільнення поживних речовин, зменшують втрати добрив і забруднення ґрунтів. Застосування таких добрив дасть змогу значно підвищити врожайність.

Існує необхідність створення нормативної документації для регламентації вимог до рівня якості та безпечності виробів, виготовлених із використанням нанотехнологій. Важливу роль також відіграє вдосконалення системи підготовки фахівців технологічного профілю. Зокрема О. Саліхова та Д. Гончаренко [18, с. 30] аналізують впровадження нанотехнологій на державному рівні, що потребує законодавчого забезпечення, формування та підтримки розвитку інноваційної інфраструктури, прогнозування і планування інноваційного розвитку, захисту інтелектуальної власності, підтримки розвитку науки та освіти, державної фінансової підтримки науково-дослідної діяльності. Натомість О. Пахолюк, Г. Пушкар, І. Галик і Б. Семак [19, с. 53] стверджують, що для більш ефективного впровадження нанотехнологій у створенні екологічно безпечних матеріалів для промисловості України необхідно розробляти нормативні документи щодо комплексної оцінки їхньої безпечності.

Формулювання цілей статті. Для виявлення головних екологічних ризиків, що існують у промисловому комплексі України, та пошуку можливих шляхів їх розв'язання під час впровадження нанотехнологій у виробничі процеси нами було сформульовано такі цілі:

- проаналізувати галузі промисловості України та актуальні екологічні ризики для них;
- визначити можливі напрями зменшення негативного впливу промисловості на довкілля;
- запропонувати використання нанотехнологій у різних галузях промисловості для створення екологічно безпечних матеріалів і підвищення ефективності виробництва.

Методика досліджень. У статті використано системний підхід, що передбачав аналіз сучасної наукової літератури щодо використання нанотехнологій, вивчення екологічних ефектів від застосування наноматеріалів у промисловості та узагальнення даних про стан розвитку нанотехнологій.

Результати досліджень. Було проаналізовано екологічно чутливі сектори економіки України та використання в них нанотехнологій. Було встановлено, що нанотехнології мають значний потенціал для екологічної модернізації промисловості України (табл. 1).

Таблиця 1

Екологічно чутливі сектори економіки України та використання в них нанотехнологій

| Галузь промисловості | Головні екологічні ризики | Можливі шляхи виправлення ситуації | Використання нанотехнологій у галузі |
|---------------------------------------|---|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Енергетика | Викиди CO ₂ , SO ₂ , пилу; радіаційні ризики; утилізація відходів | Декарбонізація; підвищення енергоефективності | Наноматеріали для підвищення ефективності сонячних батарей та акумуляторів |
| Хімічна та нафтохімічна промисловість | Хімічне забруднення; токсичні відходи; ризики аварій | Запровадження екостандартів; перехід на безпечні реагенти; мінімізація відходів | Нанопільтри для очищення викидів і стічних вод; нанокаталізатори |
| Агропромисловий комплекс | Ерозія ґрунтів; деградація земель; пестициди; метанові викиди | Органічне і точне землеробство; біогазові установки | Нанодобрива, нанопестициди з контрольованим вивільненням |
| Машинобудування | Забруднення повітря; CO ₂ та NO _x викиди в містах | Перехід на електротранспорт, енергоощадні технології; зменшення викидів, перероблення відходів; використання нанотехнологій і альтернативних джерел; автоматизація виробництва; розробка нових матеріалів і технологій | Нанопокриття для зниження тертя; наноматеріали для легких конструкцій |
| Будівництво та інфраструктура | Високе ресурсопоживання; будівельні відходи; зміна ландшафтів | Зелене будівництво, повторне використання матеріалів, енергоефективність | Нанобетон, нанопокриття для підвищення енергоефективності будівель |

Закінчення табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------------|---|--|--|
| Медицина | Медичні відходи (токсичні та біологічно небезпечні); надмірне використання одноразових пластикових матеріалів; потрапляння фармацевтичних препаратів і хімічних речовин у природні водні системи | Сортування та безпечна утилізація медичних відходів за міжнародними стандартами; використання багаторазових стерильних матеріалів; перехід на зелену енергетику в лікарнях; екологічно безпечні фармацевтичні виробництва | Розробка наночастинок для адресної доставки ліків; використання наноматеріалів у діагностиці (біосенсори, наночіпи); нанопокриття для імплантів і хірургічних інструментів; нанотехнології у створенні нових вакцин і терапевтичних засобів |
| Військово-промисловий комплекс | Забруднення ґрунтів, води й повітря токсичними речовинами під час виробництва та випробувань озброєння; утворення небезпечних відходів від вибухових речовин, палива та мастильних матеріалів; шумове, хімічне та теплове навантаження на довкілля; руйнування екосистем у зонах військових полігонів і бойових дій | Використання менш токсичних матеріалів у виробництві зброї та техніки; впровадження міжнародних стандартів утилізації військових відходів; використання систем моніторингу стану довкілля на військових об'єктах і зонах бойових дій; рекультивация земель після випробувань і бойових дій | Розробка наноматеріалів для легкої та надміцної броні; використання нанопокриттів для зменшення корозії техніки та збільшення її довговічності; створення матеріалів зі зниженою радіолокаційною та інфрачервоною помітністю; використання нанодатчиків і сенсорів для систем спостереження, виявлення газів та/або радіації; нанопаливо та нанозмазки для підвищення ефективності двигунів військової техніки |

В енергетичному секторі нанотехнології сприяють зменшенню викидів CO₂ і пилу, мінімізації радіаційних ризиків та шкоди довкіллю, а також можуть розв'язати проблеми утилізації відходів і виснаження ресурсів. Наноструктуровані матеріали підвищують ефективність і стабільність сонячних панелей, паливних елементів та акумуляторів, знижуючи ризик втрат енергії та деградації обладнання [16, с. 164]. Удосконалені технології зберігання енергії на основі наноматеріалів зменшують дефіцит електроенергії та нестабільність у системах відновлюваної енергії. Каталізатори на основі нанотехнологій мінімізують викиди від традиційного виробництва енергії, допомагаючи зменшити ризики для довкілля та здоров'я.

У хімічній і нафтохімічній промисловості головні загрози пов'язані з хімічним забрудненням, накопиченням токсичних відходів, що особливо небезпечно

на застарілих виробництвах через можливість аварій. Нанотехнології можуть посприяти розв'язанню цих проблем [20, с. 52; 21, с. 168]. Наноструктуровані катализатори підвищують ефективність хімічних реакцій, знижують споживання сировини та енергії, а також зменшують утворення шкідливих побічних продуктів. Наноматеріали, зокрема нанофільтри для очищення викидів і стічних вод, зменшують ризик потрапляння шкідливих компонентів у навколишнє середовище [10, с. 90]. Вдосконалені нанокомпозити підвищують стійкість обладнання до корозії та зношування, що знижує ймовірність аварій і промислових витоків.

В аграрному комплексі традиційні добрива та пестициди часто становлять ризик деградації ґрунту, забруднення ґрунтових вод і зниження врожайності. Нанодобрива забезпечують контрольоване вивільнення активних речовин, зменшують екологічні ризики та покращують безпеку харчових продуктів [22, с. 297]. Окрім того, наносенсори для моніторингу ґрунту та рослин допомагають уникнути ризиків, пов'язаних із дисбалансом поживних речовин, дефіцитом води та надмірним використанням хімікатів.

У машинобудуванні нанотехнології мінімізують ризик передчасного зносу, корозії та низької енергоефективності [23, с. 88]. Використання нанопокриттів та наномасил значно подовжує термін служби машин і промислового обладнання, зменшуючи час простою та ймовірність аварій, спричинених зношенням матеріалів. Наноструктуровані сплави та композити покращують механічну міцність, водночас знижуючи вагу, що зменшує ризики структурних руйнувань у транспорті та важкій техніці.

Високе ресурсоспоживання, будівельні відходи та зміна ландшафтів є серйозною загрозою для екологічної ситуації. У будівництві нанотехнології допомагають зменшити ресурсоспоживання, ризики деградації матеріалів, втрат енергії та негативного впливу на довкілля. Наноструктуровані покриття та домішки підвищують міцність, довговічність і водостійкість бетонних, металевих та композитних конструкцій [24, с. 100; 25, с. 97]. Використання наноматеріалів для теплоізоляції та енергоефективних покриттів знижує енергоспоживання будівель, зменшує ризик підвищених витрат енергії та шкідливих викидів CO₂. Окрім цього, нанокомпозити сприяють зменшенню обсягів будівельних відходів і підвищенню екологічної безпеки будівельних процесів.

У медичній галузі нанотехнології значно знижують ризики неефективної доставки ліків і побічних ефектів. Завдяки розробленню нанорозмірних носіїв ліків і систем цільової доставки, лікарські препарати можуть бути спрямовані до уражених клітин, мінімізуючи системну токсичність, що знижує ймовірність пошкодження органів або побічних імунних реакцій [25; 26, с. 4; 27, с. 79]. Наноструктуровані імпланти та антимікробні покриття знижують ризик інфекцій під час операцій, наносенсори дають змогу проводити ранню діагностику захворювань, що зменшує ймовірність ускладнень на пізніх стадіях.

У військовому секторі нанотехнології допомагають усунути ризики, пов'язані з вразливістю обладнання та персоналу в екстремальних умовах [28, с. 154]. Необхідно зосередитися на розробленні наноматеріалів для легкої та надміцної броні, створенні матеріалів зі зниженою радіолокаційною та інфрачервоною помітністю, застосуванні нанодатчиків і сенсорів для систем спостереження, виявлення газів та/або радіації. Легкі нанокомпозити зміцнюють броню та захисне спорядження без додавання надмірної ваги, зменшують ризик травм на полі бою. Нанопокриття підвищують стійкість військової техніки до корозії та екстремальних температур, знижуючи ризик механічних пошкоджень під час

критичних місій. Нанорозмірні сенсори сприяють зниженню ризиків у системах спостереження та виявлення, покращуючи чутливість до хімічних, біологічних і радіологічних загроз.

У процесі дослідження було виявлено низку бар'єрів, які гальмують впровадження нанотехнологій у промисловість України [2–6]. Провідні країни світу активно підтримують нанотехнології через державні програми для забезпечення економічного розвитку, інноваційної активності та конкурентоспроможності. На жаль, на сьогодні в Україні відсутня комплексна державна стратегія підтримки цієї ініціативи. Вітчизняна промисловість значно відстає від світових лідерів у виробництві та впровадженні наноматеріалів і нанотехнологій, а більшість досліджень фінансуються іноземними фондами [2]. Недостатнє фінансування фундаментальних і прикладних досліджень та відсутність механізмів державної підтримки комерціалізації розробок обмежують створення промислових зразків і розвиток наноіндустрії. Слабка кооперація між промисловими підприємствами та науковими установами, не дає можливості швидко впроваджувати новітні інноваційні наноматеріали у виробництво. Окрім того, українська науково-технічна база не відповідає світовим стандартам через застаріле обладнання та занепад науково-промислових центрів. Недостатнє фінансування зумовлює дефіцит висококваліфікованих кадрів у сфері нанотехнологій, а обмежена участь українських науковців у міжнародних програмах і виставках зменшує доступ до провідних технологій. Це знижує ефективність наукових і виробничих процесів. Усі ці чинники стримують розвиток вітчизняної наноіндустрії та обмежують потенціал України в глобальному конкурентному середовищі.

Для розв'язання цих проблем необхідно розробити та впровадити нормативно-правову базу для проведення стандартизації, сертифікації та безпечного використання наноматеріалів. Міжнародний досвід підтверджує, що інтеграція нанотехнологій у виробництво потребує міждисциплінарного підходу, активних інвестицій та чіткого регулювання безпеки наноматеріалів. З огляду на це, необхідно також звернути увагу на розвиток професійної освіти, створення лабораторій і майстерень, спрямованих на підготовку кваліфікованих кадрів для інноваційних галузей, що є важливим кроком для впровадження нанотехнологій в Україні.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Нанотехнології є одним із ключових інструментів забезпечення екологічної безпеки та підвищення конкурентоспроможності промисловості України. Використання наноматеріалів сприяє зменшенню промислових відходів, зниженню рівня шкідливих викидів, підвищенню енергоефективності та довговічності конструкцій. Головними перешкодами для їхнього широкого впровадження залишаються фінансові, нормативно-правові та організаційні чинники.

Нанотехнології можуть стати важливим чинником екологічної модернізації промисловості України, якщо їхній розвиток буде підкріплений науково-технічною політикою та державними інвестиціями. У процесі визначення напрямку розвитку нанотехнологій в Україні необхідно зважати на досвід тих країн, де вони розвиваються вже тривалий час.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Проценко І. Ю., Шумакова Н. І. Наноматеріали і нанотехнології в електроніці: підручник. 2-ге вид., допов. Суми: Сумський державний університет, 2024. 169 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/95197/1/Protsenko.pdf> (дата звернення: 12.09.2025).

2. Кисельова О. І. Нанотехнології та їх вплив на ринок праці: ризики для України. *Scientific notes of Lviv University of Business and Law*. 2021. № 28. С. 298–304. URL: <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/431> (дата звернення: 12.09.2025).
3. Павлова Д. А. Європейський ринок нанотехнологій та місце України на ньому. *Євроінтеграційний вектор економічного зростання України: зб. матеріалів студентської наук.-практ. Інтернет-конф.* (Київ, 21 листоп. 2024 р.). Київ: КНЕУ, 2024. 198 с. URL: https://kneu.edu.ua/userfiles/conference_MEiM_21/11/2024/24-5877_gotova.pdf#page=107 (дата звернення: 12.09.2025).
4. Мельник Т. Ю. Державна підтримка та стимулювання розвитку бізнесу в Україні під час дії воєнного стану. *Економіка, управління та адміністрування*. 2022. № 2 (100). С. 3–11. DOI: [https://doi.org/10.26642/ema-2022-2\(100\)-3-11](https://doi.org/10.26642/ema-2022-2(100)-3-11) (дата звернення: 12.09.2025).
5. Нікітін Д. В. Диспозиція України на ринку нанотехнологій. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2024. Вип. 2 (43). URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/handle/123456789/13290> (дата звернення: 12.09.2025).
6. Пушкар Г. О., Пахолюк О. В. Стан і перспективи розвитку нанонауки, нанотехнологій та ринку нанопродукції в Україні та світі. *Сучасні напрями розвитку економіки, підприємництва, технологій та їх правового забезпечення: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.* Львів: Вид-во Львівського торговельно-економічного університету, 2023. 420 с. URL: <https://surl.li/xtoedz> (дата звернення: 12.09.2025).
7. Кравчик Ю. Розвиток нанотехнологій у контексті глобальних ринкових трендів: перспекти Індустрії 5.0. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*. 2024. № 328 (2). С. 448–453. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-328-66> (дата звернення: 12.09.2025).
8. Забулонов Ю. Л., Мельниченко Т. І., Кадошніков В. М., Писанська І. Р., Одукалець Л. А., Петренко О. Д. Екологічні аспекти відновлення довкілля: нанотехнології видалення з води мікро- та нанопластиків. *Environment & Health*. 2023. № 4 (109). Р. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.32402/dovkil2023.04.060> (date of access: 12.09.2025).
9. Кислова О. В. Особливості та перспективи розвитку нанокаталізаторів. *Технології та інжиніринг*. 2022. № 5 (10). С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.4> (дата звернення: 12.09.2025).
10. Rozhdestvenska L., Kudelko K., Kolomiets Y., Dzyazko Y., Ogenko V. Membranes functionalized with 1d, 2d and 3d carbon materials. *Ukrainian Chemistry Journal*. 2021. № 87 (4). Р. 79–110. DOI: <https://doi.org/10.33609/2708-129X.87.04.2021.79-110> (date of access: 12.09.2025).
11. Трачевський В. В., Файнлейб О. М. Модифікування цементобетонних сумішей полімерними добавками, структурованими вуглецевими нанотрубками. *Polymer Journal / Polymernyi Zhurnal*. 2022. Т. 44, № 2. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/uk/article/UJRN-0001379674> (дата звернення: 12.09.2025).
12. Baibara O., Radchenko M., Ievtushenko A., Stelmakh Y., Krushynska L., Zajarniuk T., Story T. Features and theoretical analysis of electric and thermoelectric properties of Co/Al₂O₃, Co/SiO₂ and Co/TiO₂ ferromagnetic nanocomposites in the low-temperature region. *HighMatTech-2023* (Kyiv, Ukraine, October 2–6, 2023). Р. 34. URL: <https://surl.lu/riocsu> (date of access: 12.09.2025).
13. Мороз Л. В. Модифікація в'язучих та бетонів шляхом нанотехнологій. Огляд досягнень. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 3 (90). С. 44–51. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/6821/1/2.pdf> (дата звернення: 12.09.2025).
14. Яровий Р. М., Дербаба В. А. Застосування нанотехнологій в машинобудуванні. *Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених* (Дніпро, 22–24 листоп. 2023 р.): у 2-х т. Дніпро: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2023. Т.

1. 474 с. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf> (дата звернення: 12.09.2025).

15. Манохін А. С., Клименко С. А., Береснев В. М., Столбовой В. А., Клименко С. А., Мельничук Ю. О., Рижов Ю. Е., Li D., Wang H. Інтенсивність зношування різальних інструментів, оснащених PсBN із наночаровими захисними покриттями. *Надтверді матеріали*. 2020. № 6. С. 74–84. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sm_2020_6_11 (дата звернення: 12.09.2025).

16. Kuzyk N., Kutsiy S. Optimization of the perovskite solar cell structure. *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. 2024. Вип. 4, № 1. С. 163–171. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2024/may/34548/paper17.pdf> (date of access: 12.09.2025).

17. Дидів І., Дидів О., Дидів А., Юзьків М. Вплив нового комплексного мінерального добрива Нітроамофоски-М на урожайність та якість капусти цвітної. *Інноваційні розробки молоді в сучасному овочівництві: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених* (3 жовт. 2019 р.). 2020. С. 32–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vlnau_act_2021_25_21 (дата звернення: 12.09.2025).

18. Саліхова О. Б., Гончаренко Д. О. Концептуальні засади стратегії розвитку високотехнологічної індустрії лікарських засобів та медичних виробів в Україні до 2030 р. *Бізнес Інформ*. 2020. № 7. С. 28–35. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2020_7_5 (дата звернення: 12.09.2025).

19. Пахолук О. В., Пушкар Г. О., Галик І. С., Семак Б. Д. Оцінка економічних аспектів розвитку нанонауки, нанотехнологій та ринку нанопродукції в Україні у XXI столітті. *Товарознавчий вісник*. 2021. Т. 1, № 14. С. 238–248. URL: <https://scispace.com/pdf/otsinka-ekonomichnikh-aspektiv-rozitku-nanonauki-3brkyni2mr.pdf> (дата звернення: 12.09.2025).

20. Пушкар Г. О., Галик І. С., Семак Б. Д. Обґрунтування доцільності формування в Україні окремого ринку нанотекстилю та вдосконалення методів оцінки ефективності його функціонування. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2020. Вип. 24. С. 50–57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vlteu_2020_24_9 (дата звернення: 12.09.2025).

21. Новописьмений С. А. Управління інноваційними хімічними дослідженнями: стратегічні підходи до розвитку нанотехнологій та їх практичне застосування. *XVIII Полтавські хімічні читання: зб. наук. праць Всеукр. наук.-практ. конф.* (Полтава, 12–13 берез. 2025 р.). Полтава: Редакційно-видавничий відділ ПНПУ ім. В. Г. Короленка, 2025. 303 с. URL: <http://elcat.pnpu.edu.ua/docs/%D0%9A%D0%9D%D0%98%D0%93%D0%90%202025.pdf> (дата звернення: 12.09.2025).

22. Соломонова В. В., Волкова А. С., Коваленко О. Р. Нанотехнології – крок до прибуткового аграрного бізнесу. *Браславські читання. Економіка XXI століття: національний та глобальний виміри: зб. матеріалів II Міжнар. наук.-практ. конф.* (Одеса, 06 листоп. 2024 р.). Одеса: ОДАУ, 2024. 394 с.

23. Урбанський А. О., Антонюк І. О. Застосування нанотехнологій в автомобільній промисловості. *Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів*. 2024. С. 89–90. URL: https://m.tntu.edu.ua/storage/pages/00001070/TNTU_Aktualni_zadachi_suchasnyh_tehnologiy_2024.pdf (дата звернення: 12.09.2025).

24. Голик Й., Кайнц Д., Вантюх Д. Різновиди наноматеріалів та можливості їх використання у будівництві. *Містобудування та територіальне планування*. 2023. № 82. С. 95–113. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.82.95-113> (дата звернення: 12.09.2025).

25. Duriagina Z., Holyaka R., Tepla T., Kulyk V., Arras P., Eyngorn E. Identification of Fe₃O₄ nanoparticles biomedical purpose by magnetometric methods. *Biomaterials in Regenerative Medicine*. 2018. Chapter 17. P. 379–407. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.69717> (date of access: 12.09.2025).

26. Medvedovska N. V., Shekera O. G., Ovsyannikova L. M. Медична наука: виклики сьогодення та актуальні вектори розвитку. *Health of Society*. 2022. Т. 11, № 1. С. 1–5. DOI: 10.22141/2306-2436.11.1.2022.285 (дата звернення: 12.09.2025).
27. Важнича О. М., Семака О. В., Власенко Н. О., Дев'яткіна Н. М. Функціоналізація та особливості біомедичного застосування наночастинок магнетиту. *Фармакологія та лікарська токсикологія*. 2022. Т. 16, № 2. С. 75–87. DOI: <https://doi.org/10.33250/16.02.075> (дата звернення: 12.09.2025).
28. Кваша Т., Коваленко О. Технологічні тренди у сфері нових матеріалів для енергетики та військової сфери. *Grail of Science*. 2022. № 12–13. С. 154–163. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.29.04.2022.023> (дата звернення: 12.09.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 10.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025
