

Б. Троць¹, Ю.В. Івановський², Л.І. Никируй³^[0000-0002-3754-0348], О.В. Замурусва²^[0000-0003-0032-0613],
С.А. Федосов¹^[0000-0003-3457-8911]

Луцький національний технічний університет¹
Волинський національний університет імені Лесі Українки²
Карпатський національний університет імені Василя Стефаника³

НАНОТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ: ПЕРЕВАГИ, ВИКЛИКИ І ПЕРСПЕКТИВИ

На основі вивчення і аналізу передових світових досліджень, які пов'язані з можливостями застосування нанотехнологій, у статті ми провели оцінку перспектив розвитку використання нанотехнологій в енергетиці. Застосування нанотехнологій відкриває нові широкі можливості для покращення ефективності, стабільності та екологічної чистоти енергетичних систем. Однак, разом з потенційними перевагами, також вносить певні виклики і ризики, пов'язані з безпекою, екологією та регулятивними аспектами.

Ключові слова: нанотехнології, енергетика, пристрій, сонячна панель, наноматеріал, наномасштабування.

B. Trots, Yu. Ivanovskiy, L. Nykyruy, O. Zamurujeva, S. Fedosov

NANOTECHNOLOGY IN ENERGY: ADVANTAGES, CHALLENGES AND PROSPECTS

Based on the study and analysis of advanced world research related to the possibilities of applying nanotechnologies, in the article we assessed the prospects for the development of the use of nanotechnologies in the energy sector. The application of nanotechnology opens up new broad opportunities for improving the efficiency, stability and environmental friendliness of energy systems. However, along with potential advantages, it also introduces certain challenges and risks related to safety, ecology and regulatory aspects.

Keywords: nanotechnology, energy, device, solar panel, nanomaterial, nanoscaling.

Постановка проблеми. Нанотехнології є однією з найбільш інноваційних галузей науки і техніки, що вивчає та застосовує матеріали та структури на рівні нанометрів. Вони відрізняються від традиційних матеріалів своїми унікальними властивостями, такими як велика площа поверхні, висока реактивність і покращені фізичні, хімічні та електронні властивості. У сфері енергетики нанотехнології мають великий потенціал для розвитку інноваційних рішень, спрямованих на вирішення важливих енергетичних викликів сучасності [1].

Одним із напрямків використання нанотехнологій в енергетиці є розробка нових типів сонячних батарей. Використання наночастинок у сонячних панелях може покращити їхню ефективність і знизити вартість виробництва, що робить сонячну енергію більш доступною та ефективною. Інший важливий аспект – це використання нанотехнологій у розробці нових матеріалів для виробництва паливних елементів. Наноматеріали можуть покращити каталітичні властивості паливних елементів, забезпечуючи більшу ефективність конвертації енергії та знижуючи витрати на їх виробництво. Крім того, нанотехнології використовуються у розробці нових систем зберігання та передачі енергії. Наприклад, наноматеріали можуть бути використані для створення нових типів батарей з великою ємністю та швидкістю заряджання, а також для розробки ефективних систем зберігання енергії, таких як нанотехнології на основі літійових акумуляторів.

У світлі зростаючого інтересу до використання альтернативних джерел енергії та розвитку сталих енергетичних систем, нанотехнології можуть стати ключовим інструментом у досягненні цих цілей. Вони відкривають нові можливості для покращення ефективності, надійності та стійкості енергетичних систем, що сприяє переходу до більш сталого та екологічно чистого енергетичного майбутнього.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню застосування, переваг, а отже і перспектив розвитку використання нанотехнологій в енергетиці опубліковано велику кількість наукових праць. Зокрема, у базі Scopus за період 1993–2026 рр., відображено майже 11 тис. наукових публікацій. Причому, суттєве зростання активності досліджень спостерігається з 2000-их років (рис. 1) і зберігається до сьогодні. Так, у [2] надано огляд та оцінку найсучасніших фотодетекторів на основі графену, інших двовимірних матеріалів і гібридних систем, заснованих на поєднанні різних двовимірних кристалів або двовимірних кристалів та інших (нано) матеріалів, такі як плазмонні наночастинки, напівпровідники, квантові точки, або їх інтеграція з (кремнієвими) хвилеводами. У статті [3] представлено детальний огляд фізичних властивостей InN і споріднених нітридних напівпровідників III групи. Описано прогрес, перспективи і проблеми в розробці нових електронних та оптоелектронних пристроїв на основі сплавів InGaN. Досягнення в характеристиках і розумінні наноструктур InN і InGaN також розглянуті в порівнянні з їх тонкоплівковими аналогами.

Активні кристалічні поверхні SnO₂ відіграють життєво важливу роль у його багатьох цікавих властивостях, включаючи сенсорні та каталітичні застосування.

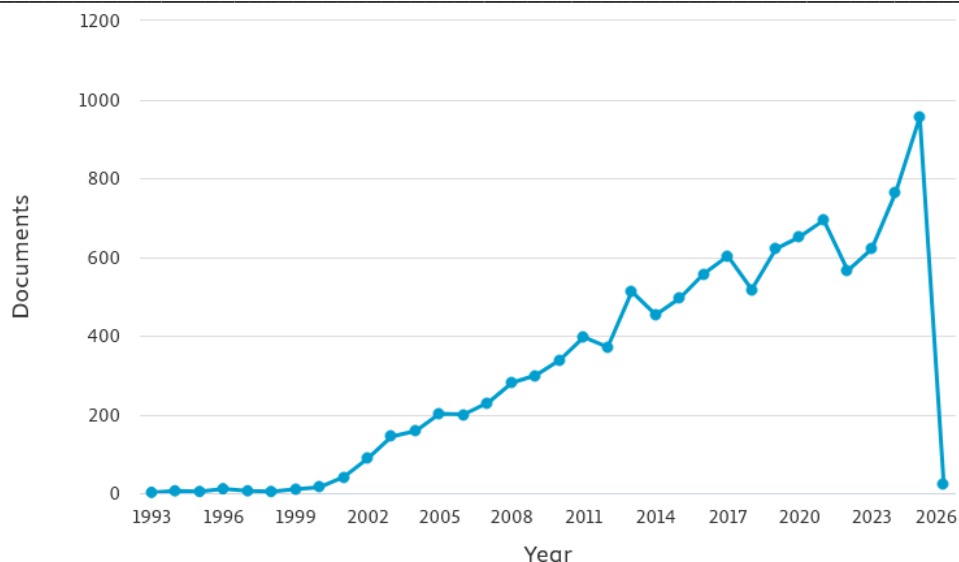


Рис. 1. Публікації за роками

Огляд [4] написано про його різні поверхні, електронну структуру та щільність станів. Обговорення важливості морфологічних варіацій властивостей SnO_2 супроводжується оглядом різних методів отримання таких структур, а також майбутній курс SnO_2 як важливого матеріалу в сучасних дослідженнях. Розвиток нанотехнологій з використанням органічних матеріалів є однією з найбільш інтелектуально та комерційно захоплюючих історій нашого часу. В огляді [5] показано, як взаємодія між синтетичною хімією та спектроскопією просунула сферу органічних наноматеріалів вперед до кінцевої мети нової технології. В огляді [6] автори зосереджуються на дослідженнях утворення нанодротяних структур шляхом високоанізотропного росту нанокристалів напівпровідникових і металооксидних матеріалів з наголосом на структурній характеристиці зародження, початкового росту, дефектів і структур розділу, а також як на теоретичному аналізі утворення нанокристалів, реакційної здатності та стабільності.

Аналіз публікацій авторитетних світових вчених у галузі наноструктур для оптоелектронних технологій пророблено у [7]. Окреслено коло провідних публікацій у науковій галузі, проаналізовано фактори впливу вчених різних країн на розвиток цієї галузі. У статті [8] представлено короткий огляд nexnano (Nexnano – це інструмент моделювання напівпровідникових нанопристроїв, розроблений для прогнозування та розуміння широкого діапазону електронних і оптичних властивостей напівпровідникових наноструктур) і надано чотири приклади, які демонструють широкий спектр можливих застосувань цього програмного забезпечення в галузі твердотільних квантових обчислень, наноелектроніки та оптоелектроніки.

У [9], на основі періодичного контакту/відокремлення між шкірою людини та мікроструктурованою полідиметилсилоксановою (PDMS) плівкою, продемонстровано прозорий гнучкий трибоелектричний наногенератор (TENG) за допомогою відносно простого, недорогого, екологічно чистого та високоефективного методу. У [10] представлено та застосовано неінвазивну оптоелектронну наноскопію для локального вимірювання оптичних та електронних властивостей графенових пристроїв. Це досягається шляхом поєднання скануючої інфрачервоної наноскопії ближнього поля з електричним зчитуванням, що дозволяє відображати інфрачервоний фотострум на масштабах довжини в десятки нанометрів. Виявлений у [11] ефект Рашби для налаштування термоелектричних характеристик може бути альтернативним методом розробки високоефективних термоелектричних матеріалів.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – на основі вивчення і аналізу передових світових досліджень, пов'язаних з можливостями застосування нанотехнологій, оцінити перспективи розвитку використання нанотехнологій в енергетиці.

Викладення основного матеріалу.

Огляд нанотехнологій. Нанотехнології є однією з найбільш активно розвиваючих галузей науки та технологій, яка ставить своїм завданням вивчення та використання матеріалів і структур на нанометровому рівні. Основні принципи нанотехнологій виникли з вивчення фізичних і хімічних властивостей матеріалів на нано-рівні. Одним з перших значущих кроків у цьому напрямку стало

винайдення мікроскопів з високою роздільною здатністю, що дозволило вченим бачити і маніпулювати з окремими атомами і молекулами.

Нанотехнології розвиваються у різних напрямках, включаючи наноматеріали, наноелектроніку, наномеханіку, нанобіологію тощо. Одним з ключових аспектів нанотехнологій є масштабування, що дозволяє створювати матеріали і пристрої з унікальними властивостями за допомогою контрольованого впливу на їхню структуру та властивості на молекулярному рівні.

Нанотехнології широко застосовуються у різних галузях науки та технології. Вони використовуються у виробництві електроніки для створення більш потужних і ефективних пристроїв, у медицині для розробки нових методів діагностики та лікування, у матеріалознавстві для створення нових матеріалів з покращеними властивостями, у космічній технології для створення легких і міцних матеріалів для космічних апаратів і багато інших сфер.

Нанотехнології мають великий потенціал для розвитку нових енергетичних технологій, таких як сонячна енергія, акумулятори високої ємності та енергоефективні матеріали. Їхній внесок у покращення енергетичних технологій є ключовим у забезпеченні сталого розвитку та зниженні викидів парникових газів.

Технології отримання наноматеріалів. Отримання наноматеріалів включає в себе різноманітні методи і процеси, що дозволяють виготовляти матеріали з нанометровими розмірами. Деякі з основних методів отримання наноматеріалів включають:

- *Механічне розчинення:* Метод використовує механічні сили для розчинення матеріалів на атомарному чи молекулярному рівні. Прикладом може бути механічне або магнітне мелювання.
- *Хімічні методи:* Включають хімічні реакції та процеси синтезу, такі як гідроліз, газофазне синтезування, золь-гель методи.
- *Відкладення з газової фази:* Методи використовують реакції в газовій фазі для відкладення атомів або молекул на поверхні матеріалів.
- *Хімічне відсаджання:* Використання хімічних процесів для росту тонких плівок чи наночастинок на підкладках або субстратах.
- *Лазерне випаровування:* Процес, при якому матеріал випаровується лазером, а потім конденсується на поверхні для формування наноструктур.

Особливості наномасштабування. Наномасштабування – це процес створення та використання матеріалів, структур і пристроїв з розмірами від кількох до декількох сотень нанометрів. Основні особливості наномасштабування включають:

- *Велика площа поверхні:* Наноматеріали мають велику відносну площу поверхні в порівнянні з їхнім об'ємом, що забезпечує їм унікальні фізичні та хімічні властивості.
- *Квантові ефекти:* Наноматеріали можуть виявляти квантові ефекти, такі як квантове тунелювання та квантові точки, які впливають на їхні електронні та оптичні властивості.
- *Висока поверхнева енергія:* Наноматеріали можуть мати високу поверхневу енергію, що призводить до зміни їхньої хімічної активності та реактивності.
- *Велика структурна аномалія:* Наноматеріали можуть демонструвати структурні аномалії, такі як зміна кристалічної структури або збільшення кількості дефектів.

Наномасштабні матеріали та структури відкривають нові можливості для розвитку інноваційних матеріалів, пристроїв та систем у різних галузях технологій, включаючи енергетику, електроніку, медицину та інші.

Застосування нанотехнологій в енергетиці. Нанотехнології в енергетиці відкривають широкі можливості для покращення ефективності, стійкості та сталості енергетичних систем. Тут розглянемо три основні напрямки застосування нанотехнологій в енергетиці.

Виробництво сонячних батарей на основі наночастинок. Сонячна енергія вважається одним із найбільш перспективних джерел альтернативної енергії, але поточні сонячні батареї мають обмежену ефективність. Застосування нанотехнологій дозволяє покращити ефективність сонячних панелей шляхом використання наночастинок. Наночастинок можуть мати унікальні фізичні властивості, такі як підвищена поглинання світла та підвищена ефективність перетворення світлової енергії на електричну. Використання наночастинок дозволяє збільшити ефективність сонячних батарей та знизити витрати на виробництво.

Використання наноматеріалів у виробництві паливних елементів. Паливні елементи – це енергетичні пристрої, що використовують хімічні реакції для виробництва електричної енергії. Застосування наноматеріалів у паливних елементах може покращити їх ефективність та стійкість.

Наприклад, наноматеріали можуть використовуватися як каталізатори для прискорення хімічних реакцій у паливних елементах, що дозволяє збільшити електричний вихід та знизити витрати палива.

Розвиток наноенергетичних систем для зберігання та передачі енергії. Нанотехнології також використовуються у розробці нових систем зберігання та передачі енергії. Наприклад, наноматеріали можуть використовуватися у батареях з високою ємністю та швидкістю заряджання, що дозволяє зберігати більше енергії та забезпечити швидке заряджання. Крім того, наноматеріали можуть бути використані у суперконденсаторах та інших енергоємних пристроях для забезпечення стабільного та ефективного зберігання енергії.

Загальний вплив застосування нанотехнологій в енергетиці полягає в покращенні ефективності та екологічної сталості енергетичних систем, що сприяє створенню більш сталого та ефективного енергетичного майбутнього.

Переваги використання нанотехнологій в енергетиці. *Підвищення ефективності енергетичних систем.* Нанотехнології дозволяють створювати нові матеріали з унікальними властивостями, що можуть значно покращити ефективність енергетичних систем. Наприклад, використання наночастинок у сонячних батареях може збільшити їхню поглинання світла та підвищити конверсійну ефективність, що призведе до збільшення виробленої електроенергії. Також, застосування наноматеріалів у паливних елементах може підвищити їхню ефективність та знизити витрати палива, що є важливим для розвитку енергоефективних технологій.

Зменшення втрат енергії під час транспортування та зберігання. Нанотехнології також можуть бути використані для створення нових матеріалів та систем для зберігання та транспортування енергії з меншими втратами. Наприклад, розробка наноматеріалів для виробництва батарей з високою ємністю та швидкістю заряджання може допомогти зменшити втрати енергії під час зберігання та транспортування електроенергії. Також, застосування наноматеріалів у провідниках може знизити опір та теплові втрати під час передачі електроенергії по мережі.

Створення нових можливостей для розвитку альтернативних джерел енергії. Нанотехнології відкривають нові можливості для розвитку альтернативних джерел енергії та зменшення залежності від вугільних та нафтових ресурсів. Вони можуть бути використані для покращення ефективності та стабільності сонячних, вітрових та гідроенергетичних установок, а також для розвитку нових технологій, таких як паливні елементи на основі водню. Це важливий крок у напрямку розвитку сталої та екологічно чистої енергетики.

Таким чином, використання нанотехнологій в енергетиці може призвести до значного покращення ефективності, стійкості та екологічної сталості енергетичних систем, що сприяє розвитку сталою та ефективного енергетичного майбутнього.

Виклики впровадження нанотехнологій в енергетиці. *Безпека та ризики зв'язані з використанням наноматеріалів.* Наноматеріали мають унікальні фізичні та хімічні властивості, але разом з цим існують певні ризики для здоров'я та навколишнього середовища. Наприклад, деякі наночастинок можуть бути токсичними при великих концентраціях або при потрапленні в організм людини через дихання чи шкіру. Також, існує ризик наноматеріалів розсіюватися в природному середовищі та впливати на екосистеми.

Екологічні аспекти виробництва та використання. Виробництво наноматеріалів може включати в себе використання різноманітних хімічних речовин та енергетичних ресурсів, що може мати негативний вплив на довкілля. Також, під час використання нанотехнологій у енергетиці необхідно враховувати можливість викидів наноматеріалів під час експлуатації та утилізації енергетичних систем.

Регулятивні аспекти впровадження нових технологій. Впровадження нанотехнологій в енергетиці вимагає розробки та впровадження ефективних регулятивних механізмів, які забезпечать безпеку та сталість використання цих технологій. Необхідно розробляти стандарти та нормативи для оцінки безпеки наноматеріалів, а також визначити правила виробництва, транспортування та використання наноматеріалів у енергетичних системах.

Вирішення цих викликів вимагає співпраці між науковими установами, промисловими компаніями, урядовими органами та громадськістю. Важливо забезпечити збалансований підхід до впровадження нанотехнологій в енергетику, що враховує як їхні потенціальні переваги, так і можливі ризики для здоров'я та довкілля.

Перспективи розвитку використання нанотехнологій в енергетиці. *Тенденції розвитку та інновації в галузі.* Нанотехнології постійно розвиваються, а разом з ними і їхнє застосування в енергетиці. Тенденції розвитку включають покращення ефективності сонячних батарей за рахунок

використання наночастинок, розвиток нових матеріалів для виробництва більш ефективних паливних елементів, а також створення енергетичних систем з вищою ємністю та швидкістю заряджання за рахунок використання наноматеріалів.

Прогнози щодо майбутнього використання нанотехнологій в енергетиці. Прогнозувати майбутнє використання нанотехнологій в енергетиці можна з впевненістю, оскільки ця галузь продовжуватиме розвиватися швидкими темпами. Прогнозується зростання використання наноматеріалів у виробництві сонячних батарей, паливних елементів, акумуляторів та інших енергетичних систем для підвищення ефективності та стабільності енергопостачання.

Рекомендації для подальших досліджень і впровадження нових рішень. Для подальшого успішного впровадження нанотехнологій в енергетиці важливо продовжувати дослідження у цій галузі та розробляти нові технології і матеріали. Рекомендації включають стимулювання державної підтримки для досліджень у галузі нанотехнологій, сприяння комерціалізації та впровадженню нових рішень, а також розвиток стандартів та нормативів для безпечного та ефективного використання наноматеріалів у енергетичних системах.

Нанотехнології мають великий потенціал для трансформації енергетичної індустрії та створення більш сталої, ефективної та екологічно чистої енергетики. З урахуванням правильних стратегій та інноваційних підходів, використання нанотехнологій може допомогти вирішити багато сучасних викликів у галузі енергетики.

Висновки. Застосування нанотехнологій у сфері енергетики відкриває широкі можливості для покращення ефективності, стійкості та екологічної чистоти енергетичних систем. Проте, разом з потенційними перевагами, використання нанотехнологій також вносить певні виклики та ризики, пов'язані з безпекою, екологією та регулятивними аспектами. Використання нанотехнологій має великий потенціал для трансформації енергетичної індустрії та створення більш сталої та ефективної енергетики, за умови врахування та вирішення всіх викликів та ризиків, пов'язаних з цим процесом.

Список використаних джерел:

6. Троць Б., Федосов С. А., Захарчук Д. А. Застосування нанотехнологій в енергетиці: переваги, виклики та перспективи. *Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи* : матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф., 18–19 жовт. 2024 р., м. Луцьк, Україна. Луцьк : ІВВ ЛНТУ, 2024. С. 167–168.
7. Koppens F.H.L., Mueller T., Avouris P., (...). Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems. *Nature Nanotechnology*. 2014. Vol. 9, № 10. P. 780–793.
8. Wu J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*. 2009. Vol. 106, № 1. 011101.
9. Das S., Jayaraman V. SnO₂: A comprehensive review on structures and gas sensors. *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 66. P. 112–255.
10. Grimsdale A.C., Müllen K. The chemistry of organic nanomaterials. *Angewandte Chemie – International Edition*. 2005. Vol. 44, № 35. P. 5592–5629.
11. Wang N., Cai Y., Zhang R.Q. Growth of nanowires. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2008. Vol. 60, № 1–6. P. 1–51.
12. Скипальський М., Івановський Ю., Замуруєва О., Федосов С. Наноструктури для оптоелектронної техніки. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2022)* : VII Всеукр. наук.-практ. конф., 23–25 лист. 2022 р., м. Дніпро, Україна : тези доп. Дніпро, Дніпров. нац. ун-т ім. Олеся Гончара, Кременчук : НОВАБУК, 2022. С. 202.
13. Birner S., Zibold T., Andlauer T., (...). Nextnano: General purpose 3-D simulations. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2007. Vol. 54, № 9. P. 2137–2142.
14. Sun J.-G., Yang T.N., Kuo I.-S., (...). A leaf-molded transparent triboelectric nanogenerator for smart multifunctional applications. *Nano Energy* 2017. Vol. 32. P. 180–186.
15. Woessner A., Alonso-González P., Lundberg M.B., (...). Near-field photocurrent nanoscopy on bare and encapsulated graphene. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. 10783.
16. Hong M., Lyv W., Li M., (...). Rashba effect maximizes thermoelectric performance of GeTe derivatives. *Joule*. 2020. Vol. 4, № 9. P. 2030–2043.

Дата надходження статті до видання: 14.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

© Б. Троць, Ю.В. Івановський, Л.І. Никируй, О.В. Замуруєва, С.А. Федосов