

В. Г. Петрук¹
С. М. Кватернюк¹
А. П. Полив'янчук¹
Р. В. Петрук¹
С. В. Гавадза¹

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТОНКОПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВІ ГРАФЕНУ В ПРОЦЕСАХ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

¹Вінницький національний технічний університет

Виконано порівняльний аналіз можливостей переробки та утилізації двох ключових елементів сонячної енергетики: традиційних кремнієвих панелей, що домінують на ринку, та перспективних тонкоплівкових на основі графену. Аналіз проведено в контексті переходу до циркулярної економіки та стрімкого зростання обсягів фотоелектричних відходів, які до 2030 року можуть сягнути 78 мільйонів тонн. Досліджено матеріальний склад кремнієвих панелей, що включає як цінні компоненти (кремній, срібло, алюміній), так і токсичні речовини (свинець, кадмій), що створює значні екологічні ризики у разі захоронення. Описано існуючі зрілі технології їх переробки — комбінацію механічних, термічних та хімічних методів, що дозволяють відновити до 80 % матеріалів з потенціалом до 99 %. Підкреслюється, що економічна доцільність цього процесу підкріплюється високою вартістю вторинної сировини, а його розвиток стимулюється державною регуляторною політикою, як Директива WEEE в ЄС, на противагу відсутності такої законодавчої бази в Україні. Як перспективну альтернативу запропоновано графенові тонкоплівкові елементи. Їхня фундаментальна перевага полягає у потенційній відсутності токсичних речовин, оскільки вони базуються на вуглеці. Це може кардинально спростити, здешевити та убезпечити процеси переробки, зміщуючи фокус з управління небезпечними відходами на відновлення нетоксичних матеріалів. Хоча технологія ще перебуває на дослідницькій стадії, інновації у здешевленні виробництва графену відкривають шлях до її майбутньої комерціалізації. Майбутнє стійкої сонячної енергетики залежить не лише від ефективності генерації енергії, а й від створення замкненого життєвого циклу. Розвиток нетоксичних матеріалів та впровадження обов'язкової відповідальності виробників за утилізацію є критичними кроками для запобігання екологічній кризі та реалізації принципів циркулярної економіки.

Ключові слова: екологічна безпека, графен, тонкоплівкові сонячні панелі, циркулярна економіка, декарбонізація, фотоелектричні відходи, утилізація

Вступ

Глобальний перехід до відновлюваних джерел енергії, де сонячна фотоелектрична (PV) енергетика відіграє провідну роль, ставить перед світовою спільнотою нові системні виклики. Попри значні екологічні переваги, життєвий цикл сонячних панелей не є безвідходним. З огляду на те, що термін служби перших масових сонячних електростанцій добігає кінця, прогнозоване накопичення до 78 мільйонів тонн відпрацьованих модулів до 2030 року становить значну екологічну та економічну загрозу. Традиційна лінійна модель економіки «Виробити–Використати–Викинути» (англ. Make–Use–Dispose) є неприйнятною для сталої енергетики, що й визначає актуальність дослідження, спрямованого на пошук ефективних моделей перероблення та утилізації в рамках циркулярної економіки «Зменшити–Використати–Переробити» (Reduce–Reuse–Recycle). Особливої гостроти ця проблема набуває для таких країн, як Україна, де відсутня спеціалізована інфраструктура

та регуляторна база для управління такими відходами.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу технічних, економічних та екологічних можливостей переробки та утилізації двох принципово різних типів фотоелектричних технологій: панівних на ринку традиційних кремнієвих панелей та перспективних тонкоплівкових матеріалів на основі графену.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Проблема утилізації відпрацьованих сонячних панелей є предметом активних наукових дискусій, що охоплюють технологічні, економічні та регуляторні аспекти. Аналіз сучасної літератури дозволяє виділити кілька ключових напрямів досліджень, які формують контекст цієї роботи.

Дослідження в галузі переробки традиційних кристалічних кремнієвих (c-Si) панелей зосереджені на підвищенні ефективності та зниженні екологічного впливу наявних технологій. Значну увагу приділено оптимізації термічних та хімічних методів для ефективного розділення шарів панелі. Наприклад, робота [1] демонструє успішне застосування низькотемпературного піролізу для видалення інкапсулюючого полімеру (EVA), що дозволяє зберегти цілісність кремнієвих пластин та підвищити чистоту відновленого скла. Інші дослідження, зокрема, [2] пропонують інноваційні гідрометалургійні процеси з використанням органічних кислот для селективного вилучення срібла та міді, що є екологічнішою альтернативою агресивним неорганічним кислотам. Попри ці досягнення, більшість публікацій визнає, що висока вартість та енергоємність залишаються головними бар'єрами для масового впровадження комплексних методів переробки [3].

Паралельно з удосконаленням переробки кремнію, наукова спільнота активно досліджує нові матеріали, що можуть докорінно змінити підхід до життєвого циклу сонячних модулів. Наприклад, роботи [4], [5] підкреслюють величезний потенціал графену та перовскітів. Дослідження [4] показують, що використання графену як прозорого провідного шару не тільки підвищує ефективність сонячних елементів, але й потенційно спрощує їхню конструкцію. Важливим є те, що ці матеріали можуть не містити токсичних важких металів, що є ключовою проблемою для кремнієвих та деяких інших тонкоплівкових технологій (наприклад, CdTe). У роботі [6] аналізується концепція «дизайну для переробки» (Design for Recycling), де наголошується, що використання водорозчинних компонентів у перовскітних елементах може дозволити майже повне відновлення матеріалів без застосування складних хімічних процесів. Проте комерціалізація цих технологій все ще обмежена проблемами довготривалої стабільності та високою вартістю виробництва високоякісного графену [5].

Третій важливий напрям досліджень стосується системного підходу до проблеми відходів через призму циркулярної економіки. Вчені аналізують не лише технології, а й бізнес-моделі та політичні інструменти. Дослідження Європейської агенції з довкілля [7] чітко демонструє, що впровадження Директиви WEEE в ЄС стало головним рушієм розвитку інфраструктури з переробки сонячних панелей. Принцип «розширеної відповідальності виробника» (EPR), згідно з яким виробники фінансують утилізацію своєї продукції, стимулює інвестиції в галузь. На противагу цьому, роботи, що аналізують ситуацію в країнах без подібного регулювання, вказують на майже повну відсутність ринку переробки та накопичення відходів на звалищах [8]. Авторами наголошується, що без сильного законодавчого тиску економічні стимули для переробки є недостатніми, оскільки захоронення відходів залишається дешевшим варіантом [3], [7].

Таким чином, аналіз останніх публікацій показує, що хоча технології переробки кремнієвих панелей стають дедалі досконалішими, вони вирішують наслідки, а не причину проблеми — складний та потенційно токсичний склад продукту. Перспективні матеріали, зокрема, графен, пропонують фундаментально новий підхід, заснований на екологічно безпечному дизайні. Проте розрив між лабораторними дослідженнями нових матеріалів та промисловим впровадженням систем їх переробки залишається значним.

Постановка задачі

У роботі поставлено такі завдання:

- проаналізувати матеріальний склад, структуру та наявні технології переробки традиційних кремнієвих сонячних панелей, оцінивши їхню економічну доцільність та екологічні ризики.
- дослідити властивості та потенціал тонкоплівкових панелей на основі графену з погляду їхнього життєвого циклу, зокрема переваги, пов'язані з відсутністю токсичних компонентів.
- здійснити порівняльний аналіз обох технологій за ключовими критеріями: токсичність мате-

ріалів, складність технологічних процесів переробки, ефективність відновлення цінних ресурсів та економічні стимули.

– визначити основні виклики для індустрії переробки PV-модулів та сформулювати рекомендації щодо розробки ефективної регуляторної політики для створення замкнутого циклу виробництва в сонячній енергетиці.

Аналіз методів інтеграції графену в тонкоплівкові сонячні панелі

Інтеграція графену та його похідних у структуру тонкоплівкових сонячних панелей (зокрема, перовскітних та органічних) є одним із найперспективніших напрямів досліджень, спрямованих на підвищення їхньої ефективності, стабільності та гнучкості. Унікальні властивості графену: виняткова електропровідність, оптична прозорість (~97,7 %), механічна міцність та хімічна інертність, — дозволяють використовувати його для модифікації сонячного елемента та виділити чотири основні методи інтеграції графену.

1. *Графен як прозорий провідний електрод* (Transparent Conductive Electrode — TCE). Це найпоширеніший і найвивченіший метод застосування графену. Він виступає як заміна традиційному оксиду індію-олова (ITO), який має суттєві недоліки: крихкість, висока вартість через обмеженість запасів індію та деградація під дією кислот. Високоякісний одно- або кількшаровий графен вироблюється методом хімічного осадження з парової фази (CVD) на мідній або нікелевій фользі. Після цього графен переноситься на гнучку або скляну підкладку сонячного елемента. Використання графену дозволяє створювати по-справжньому гнучкі та розтяжні сонячні панелі, що неможливо з крихким ITO [9]. Це відкриває шлях для інтеграції фотовольтаїки в гнучкі матеріали та вигнуті поверхні. Для досягнення провідності, співставної з ITO, часто потрібне легування графену (наприклад, азотною кислотою або солями золота) або створення багатошарових структур, що може дещо знизити його прозорість та ускладнити технологію [10].

2. *Графен у шарах транспортування заряду* (HTL та ETL). Ефективність сонячного елемента значною мірою залежить від того, наскільки швидко та без втрат фотогенеровані електрони та «дірки» досягають відповідних електродів. Графен та його похідні (оксид графену — GO, відновлений оксид графену — rGO) використовуються для поліпшення шарів транспортування дірок (HTL) та шарів транспортування електронів (ETL). Функціоналізований графен (найчастіше GO та rGO) вводиться у вигляді домішки до стандартних матеріалів HTL (до прикладу, PEDOT:PSS) або ETL (до прикладу, TiO_2 , ZnO). Завдяки тому, що ці матеріали можуть бути дисперговані у розчинах, їх легко наносити методами друку або спін-коатінгу. Графен створює додаткові шляхи для швидкого руху носіїв заряду, зменшуючи електричний опір шару та пригнічуючи рекомбінацію (втрату) зарядів на межі з активним шаром. Це безпосередньо підвищує коефіцієнт заповнення (Fill Factor) та загальну ефективність пристрою [11].

3. *Модифікація та пасивація активного шару*. Довготривала стабільність, особливо у перовскітних сонячних елементах, є однією з головних перешкод для їхньої комерціалізації. Графен використовується для захисту та стабілізації самого світлопоглинального (активного) шару. Невелику кількість графенових квантових точок (GQD) або функціоналізованих нанопластинок графену додають безпосередньо до розчину-прекурсору перовскіту перед його кристалізацією. Наночастинки графену вбудовуються на межах між кристалічними зернами перовскіту. Вони виконують дві ключові функції: пасивація дефектів (заповнюють вакансії та дефекти структури, які є центрами рекомбінації зарядів) та гідрофобний бар'єр (створюють захисний шар, що перешкоджає проникненню вологи — головного фактора деградації перовскіту). Такий підхід дозволяє одночасно підвищити як ефективність, так і довготривалу стабільність сонячних елементів, що є критично важливим для їх практичного застосування [12].

4. *Графен як бар'єрний та інкапсулюючий шар*. Через свою виняткову непроникність для більшості газів, зокрема, кисню та водяної пари, графен є ідеальним кандидатом для створення надтошких захисних покриттів. Шар графену, вирощений методом CVD, наноситься поверх готового сонячного елемента як фінальний шар інкапсуляції. Також можуть використовуватися композитні полімерно-графенові плівки. На відміну від громіздких скляних або полімерних інкапсулянтів, графенове покриття є практично невагомим, прозорим та гнучким. Воно забезпечує надійний захист чутливих органічних або перовскітних шарів від деградації під впливом навколишнього середовища, зі значним подовженням терміну служби пристрою [13]. Таким чином, інтеграція графену є багатогранною стратегією, що дозволяє вирішувати ключові проблеми тонкоплівкової фотовольтаїки — від підвищення ефективності та гнучкості до кардинального покращення стабі-

льності та довговічності.

Порівняльна модель аналізу матеріальних потоків для управління життєвим циклом фотоелектричних панелей

В основі аналізу матеріальних потоків (Material Flow Analysis — MFA) лежить принцип збереження маси, який стверджує, що маса, яка входить у систему, повинна або залишити систему як вихід, або накопичитися в її межах. Застосування цього принципу до макросистем, таких як управління відходами, дозволяє кількісно визначити потоки матеріалів, що переміщуються між різними секторами економіки.

Сучасні підходи до MFA, зокрема динамічний MFA (dMFA), інтегрують часові фактори, такі як термін служби продукту, для прогнозування майбутніх потоків відходів. Це є критично важливим для галузі сонячних панелей, оскільки їхній типовий термін служби становить 25 років. Динамічне моделювання дозволяє оцінити майбутній «урбаністичний видобуток» (urban mining) і прогнозувати, коли саме обсяги відходів досягнуть критичної маси, що вимагатиме широкомасштабних рішень.

Кристалічні кремнієві сонячні панелі, що є домінуючою технологією на ринку, мають добре вивчений матеріальний склад, що безпосередньо впливає на їхню переробку. За даними [14] типова c-Si панель за вагою складається з таких компонентів:

- скло: близько 76 %;
- пластиковий полімер: близько 10 % (зазвичай EVA, етиленвінілацетат);
- алюміній: близько 8 % (для рами);
- кремній: близько 5 % (як напівпровідник);
- мідь: близько 1 %;
- срібло та інші метали: менше 0,1 %.

Кожен з цих матеріалів виконує важливу функцію. Алюмінієві рами забезпечують міцність і захист від зовнішніх пошкоджень [14]. Загартоване скло захищає внутрішні компоненти, пропускаючи понад 93 % світла [14]. Кремній, основний напівпровідниковий матеріал, перетворює світло на електроенергію. Незважаючи на малу кількість, срібло та інші метали можуть становити до 10 % загальної вартості панелі [15], через що вони є цінними об'єктами для відновлення.

Після термічного розділення для вилучення цінних металів і кремнію застосовуються гідрометалургійні процеси. Вони включають хімічне травлення з використанням сильних кислот, таких як азотна кислота (HNO_3), фосфорна кислота (H_3PO_4) або суміш кислот [16]. Ці методи дозволяють досягти такої ефективності відновлення [17]:

- кремній: ефективність відновлення досягає 98,9 % [15] (хоча в інших дослідженнях зазначається 86 % [16]);
- срібло: відновлення сягає 94 %...99 % за допомогою гідрометалургічних процесів з використанням азотної кислоти або сірчано-кислотних розчинів [17];
- алюміній: відновлюється з ефективністю 92 %...94 % [17];
- мідь: відновлюється з ефективністю 72 %...90 % [17].

Тонкоплівкові технології, зокрема ті, що використовують графен, пропонують альтернативний підхід, орієнтований на зменшення матеріального сліду. Графен є унікальним двовимірним матеріалом, що складається з одноатомного шару вуглецю, організованого в гексагональну ґратку [18]. Завдяки своїм надзвичайним властивостям — гнучкості, прозорості, надзвичайній міцності (в 200 разів міцніший за сталь) та чудовій електропровідності [19] — графен розглядається як заміна традиційним матеріалам, таким як оксид індію-олова (ITO), що використовуються в тонкоплівкових комірках [19]. Графен може бути інтегрований у гібридні сонячні елементи як прозорий електрод, що замінює традиційні металеві сітки [20]. Один з найперспективніших напрямків — це поєднання графену з перовскітами — класом матеріалів з кристалічною структурою, схожою на мінерал перовскіт (CaTiO_3) [18]. Типовий перовскітний сонячний елемент включає такі шари: провідне скло (наприклад, FTO), шар діоксиду титану (TiO_2), шар перовскіту (наприклад, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), шар для транспортування дірок (HTM) та золотий електрод [17]. Використання графену в тонкоплівкових панелях зменшує потребу у великій кількості сировини, оскільки він надзвичайно тонкий, що може значно знизити виробничі витрати [19]. Проте, присутність у перовскітних елементах свинцю (PbI_2), хоч і в невеликих кількостях, вимагає розробки ефективних та безпечних систем переробки, щоб запобігти забрудненню довкілля [21].

Традиційні методи розділення шарів перовскітних елементів часто вимагали використання токсичних органічних розчинників, таких як диметилформамід (DMF), що є небезпечним для довкіл-

ля і може викликати рак [21]. Однак, нещодавні дослідження розробили проривний метод, що використовує воду як основний розчинник. Цей процес дозволяє багаторазово переробляти всі компоненти перовскітних сонячних елементів: скло, електроди, шари перовскіту та шар транспортування заряду, — без втрати ефективності [15]. Це особливо важливо, оскільки найдорожчий компонент перовскітних комірок — провідне скло FTO, може бути повторно використаний без значного зниження продуктивності [21].

Використаємо модель MFA на основі принципу масового балансу для відстеження потоків матеріалів у системі утилізації фотоелектричних панелей. Потік починається з моменту виведення панелі з експлуатації (EoL) і закінчується на виході з системи переробки у вигляді вторинної сировини, вторинних матеріалів з доданою вартістю або відходів, що прямують на сміттєзвалище.

Використаємо такі припущення: типовий термін служби панелі становить 25 років, матеріальний склад панелей вважається сталим, ефективність відновлення матеріалів є середнім значенням, отриманим з наявних досліджень, транспортні витрати та витрати на збір є ключовими економічними параметрами.

Формальне математичне представлення моделі MFA виражено рівняннями масового балансу для ключових матеріальних запасів та потоків. Масовий потік кожного матеріалу i на вході в систему ($M_{i,in}$) визначається як добуток кількості панелей (N_{panels}) на масу цього матеріалу в одній панелі (M_i)

$$M_{i,in} = N_{panels} \cdot M_i. \quad (1)$$

Згідно з принципом збереження маси, загальна вхідна маса матеріалу повинна розподілитися між потоком переробки ($M_{i,rec}$) та потоком захоронення ($M_{i,land}$)

$$M_{i,in} = M_{i,rec} + M_{i,land}. \quad (2)$$

Маса відновленого матеріалу $M_{i,rec}$ є функцією ефективності переробки ($\eta_{i,rec}$)

$$M_{i,rec} = M_{i,in} \cdot \eta_{i,rec}. \quad (3)$$

Відповідно, маса матеріалу, що потрапляє на сміттєзвалище, розраховується як

$$M_{i,land} = M_{i,in} (1 - \eta_{i,rec}). \quad (4)$$

Загальна вартість матеріалів, що надходять у систему переробки ($V_{total,rec}$), визначається сумою вартості всіх відновлених матеріалів розрахованою з урахуванням їхньої маси ($M_{i,rec}$) та питомої вартості ($V_{i,rec}$)

$$V_{total,rec} = \sum_i (M_{i,rec} \cdot V_{i,rec}). \quad (5)$$

Далі обчислюється вартість отриманої вторинної сировини, як вартість матеріалів, що надходять у систему переробки мінус вартість самої переробки.

На основі наведеного математичного представлення моделі MFA авторами складено програмне забезпечення на Python адаптоване для використання на Google Colab, що зручно для використання у навчальному процесі студентів Вінницького національного технічного університету за спеціальностями E2 — Екологія та G2 — Технології захисту навколишнього середовища. Результати розрахунку порівняльного аналізу матеріальних потоків переробки сонячних панелей показані на рис. 1.

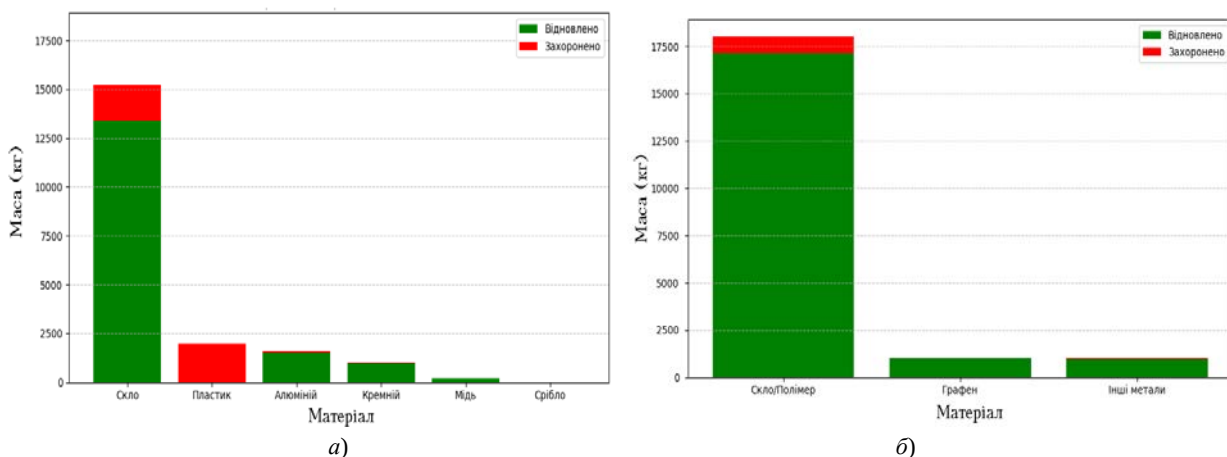


Рис. 1. Порівняння матеріальних потоків переробки фотоелектричних панелей:

а — традиційні кремнієві; б — тонкоплівкові графенові

Обговорення результатів

Застосування моделі MFA демонструє, що і традиційні, і нові технології мають високий потенціал для відновлення матеріалів. Для c-Si панелей, ефективність вилучення кремнію та срібла, які є основними цінними компонентами, досягає понад 90 % [17]. Це підтверджує, що технологічний потенціал для створення циркулярної економіки для c-Si панелей вже існує. Для тонкоплівкових панелей, хоча дані про ефективність масового відновлення є менш усталеними, фокус на повторному використанні найдорожчого компонента (провідного скла) забезпечує високу економічну ефективність [21].

Проте, виходячи з оцінки економічних показників, переробка традиційних кремнієвих сонячних панелей є значно дорожчою, ніж їх захоронення. Вартість процесу відновлення матеріалів перевищує вартість отриманих вторинних матеріалів, процес відновлення є збитковим (збиток \$10...25 на одну панель), що призводить до того, що до 90 % відходів наразі потрапляють на сміттєзвалища [22]. При цьому для тонкоплівкових графенових панелей вартість процесу відновлення матеріалів також перевищує вартість отриманих вторинних матеріалів і процес відновлення також є збитковим (збиток \$1...5 на одну панель). Зростання попиту на сировину для енергетичного переходу невідворотно призведе до підвищення цін, що з часом зробить переробку економічно вигіднішою, ніж захоронення.

Чутливість моделі MFA до змін ключових параметрів вказує на те, що майбутня економічна доцільність переробки залежить від таких факторів:

- технологічний прогрес — вдосконалення технологій переробки може знизити витрати та збільшити ефективність відновлення;
- зниження вартості логістики відходів — оптимізація транспортних мереж та створення ефективних систем збору є критично важливими, оскільки логістика є значним чинником витрат, особливо в сільській місцевості;
- зростання ринкової вартості вторинних матеріалів;
- зростання попиту та цін на рідкісні метали, необхідні для енергетичного переходу, зробить переробку привабливішою, ніж захоронення.

Розроблена модель аналізу матеріальних потоків кількісно демонструє, що, хоча технології переробки фотоелектричних панелей є високоефективними, їхнє масове впровадження наразі стримується економічною недоцільністю порівняно із захороненням на сміттєзвалищах. Модель також підкреслює, що майбутній перехід до тонкоплівкових технологій, таких як панелі на основі графену та перовскіту, може сприяти створенню екологічно безпечніших та економічно вигідніших процесів переробки, зосереджених на повторному використанні, а не лише на вилученні.

Висновки

Проведене дослідження дозволило здійснити комплексний порівняльний аналіз життєвих циклів традиційних кремнієвих та перспективних графенових тонкоплівкових сонячних панелей у контексті принципів циркулярної економіки та проблеми зростання фотоелектричних відходів.

Технології переробки кремнієвих панелей є зрілими, але економічно не вигідними без державного регулювання. Наявні комбіновані методи (механічні, термічні, хімічні) дозволяють досягти високих показників відновлення цінних матеріалів. Проте через високу енергоємність та складність процесів, а також наявність токсичних компонентів (свинець, кадмій), вартість переробки наразі перевищує ринкову вартість видобутої сировини. Як показало моделювання, збитковість може сягати \$10...25 на панель, що за відсутності законодавчих вимог, подібних до Директиви WEEE в ЄС, робить захоронення на звалищах економічно привабливішим варіантом.

Графенові тонкоплівкові панелі пропонують фундаментальну перевагу — «дизайн для переробки» (Design for Recycling). Їхня ключова перевага полягає не стільки в ефективності переробки, скільки у потенційній відсутності токсичних важких металів та значно меншій матеріалоемності. Це кардинально змінює парадигму управління відходами: замість складного процесу знешкодження небезпечних речовин фокус зміщується на просте та дешеве відновлення нетоксичних матеріалів. Модель аналізу матеріальних потоків показала, що економічний розрив для цих технологій значно менший (збиток \$1...5 на панель), а інноваційні методи переробки, засновані на водних розчинниках, відкривають шлях до майже повного повторного використання компонентів.

Водночас, для подолання економічних бар'єрів критично важливим є впровадження в Україні законодавчої бази за принципом розширеної відповідальності виробника (EPR). Такий підхід стиму-

люватиме інвестиції в інфраструктуру переробки, сприятиме розвитку ринку вторинної сировини та зробить сталу сонячну енергетику по-справжньому «зеленою» на всіх етапах її життєвого циклу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Wu Zhipeng, et al., “A novel method for layer separation in waste crystalline silicon PV modules via combined low-temperature and thermal treatment,” *Waste Management*, vol. 172, pp. 299-307, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.10.036>.
- [2] Choi Jong-Won, et al., “Simple, green organic acid-based hydrometallurgy for waste-to-energy storage devices: Recovery of NiMnCoC₂O₄ as an electrode material for pseudocapacitor from spent LiNiMnCoO₂ batteries,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 424, Part B, 127481, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127481>.
- [3] Т. В. Пімоненко, та ін., «Розвиток сонячної енергетики в Україні у контексті переходу до вуглецево-нейтральної економіки», *Вісник СумДУ. Серія «Економіка»*, № 1, с. 208-220, 2021. <http://dx.doi.org/10.21272/1817-9215.2021.1-24>.
- [4] S. K. Behura, et al., “Graphene–semiconductor heterojunction sheds light on emerging photovoltaics,” *Nat. Photonics*, vol. 13, pp. 312-318, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0391-9>.
- [5] W. Kong, et al., “Path towards graphene commercialization from lab to market,” *Nat. Nanotechnol.*, vol. 14, pp. 927-938, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0555-2>.
- [6] V. Larini, et al., “Circular management of perovskite solar cells using green solvents: from recycling and reuse of critical components to life cycle assessment,” *EES Sol.*, vol. 1, pp. 378-390, 2025. <https://doi.org/10.1039/D4EL00004H>.
- [7] G. Walther, et al., “Implementation of the WEEE-directive — economic effects and improvement potentials for reuse and recycling in Germany,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 47, pp. 461-474, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2243-0>.
- [8] Zoë Lenkiewicz, et al. *Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an Age of Waste – Turning Rubbish into a Resource*. United Nations Environment Programme: Nairobi, 2024. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>.
- [9] Dong Hee Shin, et al., “Highly-flexible graphene transparent conductive electrode/perovskite solar cells with graphene quantum dots-doped PCBM electron transport layer,” *Dyes and Pigments*, vol. 170, pp. 107630, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.107630>.
- [10] K. Parvez, et al. *Graphene as Transparent Electrodes for Solar Cells*. 2015. <https://doi.org/10.1002/9783527680016.ch10>.
- [11] A. Negash, et al., “Application of reduced graphene oxide as the hole transport layer in organic solar cells synthesized from waste dry cells using the electrochemical exfoliation method,” *New Journal of Chemistry*, vol. 46(27), pp. 13001-13009, 2022. <http://dx.doi.org/10.1039/D2NJ01974D>.
- [12] Z. Wang, et al., “Defects and Defect Passivation in Perovskite Solar Cells,” *Molecules*, vol. 29(9), 2104, 2024. <https://doi.org/10.3390/molecules29092104>.
- [13] J. A. Alexander-Webber, et al., “Encapsulation of graphene transistors and vertical device integration by interface engineering with atomic layer deposited oxide,” *2D Materials*, vol. 4, 2017. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/4/1/011008>.
- [14] 8 Major Raw Materials Used for Making Solar Panels. Vishakha Renewables, 2025. [Electronic resource]. Available: <https://vishakharenewables.com/blog/8-major-raw-materials-used-for-making-solar-panels/>. Accessed: September 5, 2025.
- [15] X. Xiao, et al., “Aqueous-based recycling of perovskite photovoltaics,” *Nature*, vol. 638, pp. 670–675, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08408-7>.
- [16] K. Sukmin, et al., “Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules,” *Renewable Energy*, vol. 47, pp. 152-159, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.030>.
- [17] F. Ardent et al., “Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling,” *Waste Manag.*, vol. 91, pp. 156-167, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.059>.
- [18] Perovskites and graphene. Perovskite-Info, 2025. [Electronic resource]. Available: <https://www.perovskite-info.com/perovskites-and-graphene>. Accessed: September 5, 2025.
- [19] A. Usman, “Graphene: The Future of Solar Cells?” *AZoM*, 2021. [Electronic resource]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=21100>. Accessed: September 5, 2025.
- [20] L. Pengfei, et al., “Graphene-Based Transparent Electrodes for Hybrid Solar Cells,” *Frontiers in Materials*, vol. 1, 2014. <https://doi.org/10.3389/fmats.2014.00026>.
- [21] A. Binek, et al., “Recycling Perovskite Solar Cells To Avoid Lead Waste,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 8 (20), pp. 12881-12886, 2016. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b03767>.
- [22] *Silicon Extraction Methods from Recycled Solar Cells*, 2025. [Electronic resource]. Available: <https://xray.greyb.com/solar-cells/end-of-life-silicon-extraction>. Accessed: September 5, 2025.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 18.09.2025

Петрук Василь Григорович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: petrukvvg@gmail.com ;

Кватернюк Сергій Михайлович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: kvaternuk@vntu.edu.ua ;

Полив'ячук Андрій Павлович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: polyvianchuk_a@vntu.edu.ua ;

Петрук Роман Васильович — д-р техн. наук, професор, професор, кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: prroma07@gmail.com ;

Гавадза Сергій Вячеславович — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: sergeygavadza@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. G. Petruk¹
 S. M. Kvaterniuk¹
 A. P. Polyvyanchuk¹
 R. V. Petruk¹
 S. V. Gavadza¹

Analysis of the Promising Thin Film Materials for Graphene — Based Solar Panels in Decarbonization and Circular Economy Processes

¹Vinnitsia National Technical University

The paper is devoted to a comparative analysis of the possibilities of recycling and utilization of two key technologies of solar power: conventional silicon panels, dominating the market, and advanced thin-film graphene-based ones. The analysis was conducted in the context of the transition to a circular economy and the rapid growth of photovoltaic waste volumes, which by 2030 may reach 78 million tons. The material composition of silicon panels was studied, which includes both valuable components (silicon, silver, aluminum) and toxic substances (lead, cadmium), which creates significant environmental risks during disposal. Existing mature technologies for their recycling are described - a combination of mechanical, thermal and chemical methods that allow recovering up to 80 % of materials with a potential of up to 99 %. It is emphasized that the economic feasibility of this process is supported by the high cost of secondary raw materials, and its development is stimulated by state regulatory policies, such as the WEEE Directive in the EU, in contrast to the lack of such a legislative framework in Ukraine. Graphene thin-film elements are presented as a promising alternative. Their fundamental advantage lies in the potential absence of toxic substances, since they are carbon-based. This can radically simplify, reduce the cost and make recycling processes safer, shifting the focus from hazardous waste management to the recovery of non-toxic materials. Although the technology is still at the research stage, innovations in reducing the cost of graphene production open the way to its future commercialization. The future of sustainable solar power engineering depends not only on the efficiency of energy generation, but also on the creation of a closed life cycle. The development of non-toxic materials and the introduction of mandatory producer responsibility for disposal are critical steps to prevent the environmental crisis and implement the principles of the circular economy.

Keywords: graphene, thin-film solar panels, circular economy, decarbonization, photovoltaic waste, recycling.

Petruk Vasyl G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: petrukvg@gmail.com ;

Kvaterniuk Serhii M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: kvaternuk@vntu.edu.ua ;

Polyvianchuk Andriy P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: polyvianchuk_a@vntu.edu.ua ;

Petruk Roman V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: prroma07@gmail.com ;

Gavadza Serhii V. — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: sergeygavadza@gmail.com