

УДК 535.2

ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Трихлеб А.С. – гр. дФЕЕЕ-23, аспірант, a.trykhlieb@gmail.com
Шведчикова І.О. – д.т.н., професор, shvedchykova.io@knutd.edu.ua
Київський національний університет технологій та дизайну

Метою роботи є огляд останніх досліджень та розробок у сфері подовження з відпрацьованими фотоелектричними модулями, зокрема аналіз сучасних технологій переробки, регуляторних підходів у різних країнах та перспектив інтеграції принципів циркулярної економіки у життєвий цикл сонячних панелей. Особлива увага приділяється етапу завершення строку експлуатації (End of Life, EoL) як критично важливого для зменшення екологічного навантаження та підвищення ефективності використання ресурсів. Актуальність теми дослідження зумовлена суттєвим екологічним впливом життєвого циклу фотоелектричних модулів на довкілля, особливо на етапі завершення строку їх експлуатації, коли виникають значні екологічні ризики через накопичення відходів, що містять потенційно небезпечні матеріали. У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні ефективних стратегій поводження з відпрацьованими фотоелектричними модулями, а також у розвитку нормативно-правової бази та технологій переробки.

Хоча на сьогодні накопичено чимало знань про потенційні екологічні загрози, пов'язані із завершенням строку експлуатації (EoL) сонячних панелей, лише обмежена кількість країн має спеціальні нормативні акти щодо управління такими відходами. Інтеграція принципів циркулярної економіки дозволяє розробити та впровадити цільові стратегії для переробки EoL-модулів, що суттєво зменшить їхній негативний вплив на довкілля – саме цей аспект є одним із ключових викликів у галузі фотовольтаїки. Тому дослідження [1-4] наголошують на необхідності поєднання оцінки життєвого циклу, циркулярного підходу та системного мислення для забезпечення сталого розвитку в процесі поширення сонячних технологій так, аби перехід до декарбонізації не супроводжувався новими екологічними проблемами, зумовленими відходами.

Огляд останніх наукових публікацій показує, що ключовими напрямками є впровадження принципів циркулярної економіки, використання LCA (оцінки життєвого циклу) та розвиток технологій відновлення цінних матеріалів [1, 2]. Зокрема, виявлено високий потенціал піролізу, хімічного травлення,

механічних та гідрометалургійних методів для відновлення чистих матеріалів із кристалічних і тонкоплівкових панелей [1].

У китайському контексті, де зосереджено найбільші обсяги виробництва і встановлення PV-панелей, проблема накопичення відходів стає дедалі актуальнішою. Дослідження [3] оцінює вуглецеві сліди за різних сценаріїв утилізації та свідчить про значне скорочення викидів CO₂ при переході до ефективної переробки – до 50% для всього життєвого циклу [3].

Комплексна техніко-економічна оцінка замкнених систем переробки в Китаї демонструє, що повна утилізація компонентів забезпечує найкращі екологічні та фінансові результати, тоді як часткові сценарії можуть бути ефективнішими для малих підприємств на початкових етапах. Це відкриває можливості для поетапного розвитку інфраструктури переробки з перспективою створення галузевої кооперації [4].

Висновок. Очікуване зростання обсягів відпрацьованих сонячних панелей робить питання їх утилізації критично важливим для екологічної сталості енергетичного переходу. Найбільший вплив на довкілля має кінцева стадія життєвого циклу (EoL), однак більшість країн досі не мають чітких регламентів щодо поводження з PV-відходами. Ефективне вирішення цієї проблеми потребує інтеграції оцінки життєвого циклу, принципів циркулярної економіки та системної динаміки, що дозволить мінімізувати шкоду довкіллю та підвищити ресурсну ефективність. Перспективним напрямом є впровадження замкнених циклів переробки, які вже демонструють екологічні й економічні переваги, особливо в умовах міжсекторальної співпраці й належного державного регулювання.

Л і т е р а т у р а

1. Mukwevho N., Mkhohlakali A., Ntsasa N. et al. 2025. Methodological approaches for resource recovery from end-of-life panels of different generations of photovoltaic technologies – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 207, January 2025, 114980. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114980.
2. Kwok K. H., Savaget P., Fukushima S., Halog A. 2024. The necessity for end-of-life photovoltaic technology waste management policy: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 461 142497, pp. 1-17. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142497.
3. An M., Sun X. 2024. Carbon footprints of solar panels in China provinces based on different production and waste treatment scenarios», *Journal of Cleaner Production*, 435, 140453. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140453.
4. Wang Q., Wang Y., Huang B. et al. 2025. Techno-economic and environmental assessment of closed-loop photovoltaic recycling in China. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 56, pp. 1–12, DOI: 10.1016/j.spc.2025.02.025.