

УДК 621.454.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771362018158272>

Т. Т. Сілакова¹, к.ф.-м. н., доцент, Н. М. Руденко², к.ф.-м. н., доцент

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

En

The article makes an attempt to analyze the directions of solar batteries utilization. Trends in the solar energy development show that the introduction of solar power plants is continuously growing. It is established that along with the undoubted ecological advantages of such stations in the conversion of solar energy into electrical energy, there is the problem of solar modules utilizing, the technology of which is associated with additional emissions of pollutants. This circumstance requires a separate study in assessing the lifecycle of solar powerplants.

Ru

В статье сделана попытка проанализировать направления утилизации солнечных батарей. Тенденции развития гелиоэнергетики показывают, что введение мощностей солнечных электростанций непрерывно растет. Установлено, что наряду с несомненными экологическими преимуществами таких станций при преобразовании солнечной энергии в электрическую существует проблема утилизации солнечных модулей, технология которой связана с дополнительными выбросами загрязняющих веществ. Данное обстоятельство требует отдельного исследования при оценке жизненного цикла солнечных электростанций.

¹ НТУУ «КПІ ім. гора Сікорського», кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла

² НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», кафедра радіоприймання та оброблення сигналів

Вступ

Вважається, що альтернативна енергетика, включаючи сонячні батареї, набагато «чистіше» традиційної. Всі ці тепло- та атомні електростанції становлять певну небезпеку для навколишнього середовища. Фахівці із некомерційної організації *Environmental Progress (EP)* стверджують, що із фотоелементами теж не все так добре, як прийнято вважати. У 2017 році опубліковані результати досліджень, проведених *EP*, де говориться, що сонячні батареї – джерело небезпечних відходів із вмістом великої кількості таких елементів, як свинець, хром, кадмій [1]. У той же час фотоелементи, які вийшли із ладу, відправляють на смітник без належної утилізації, де процес їх руйнування ніхто не контролює. Тому через 10–15 років проблема утилізації сонячних панелей встане в повний зріст.

Окрім того, виробники сонячних батарей стикаються із серйозною проблемою – утилізацією токсичних відходів свого виробництва. Поки конкретного вирішення цієї проблеми не знайдено.

Питання утилізації сонячних модулів є об'єктом пильної уваги наукових досліджень і методичних розробок. Такі науковці як Кучеров А. В., Шибилева О. В., Дмитриков В. П., Падалка В. В., Проценко О. В., Коломеєц В. І. і багато інших внесли вагомий вклад у дослідження проблеми утилізації відходів виробництва сонячних батарей. Принципи, що закладені у роботах цих авторів стали фундаментом для подальших досліджень у даній сфері. Незважаючи на отримані результати у даній сфері, залишаються питання щодо можливостей утилізації відходів виробництва сонячних батарей.

Постановка задачі

Метою статті є розгляд можливостей утилізації відходів сонячних батарей.

Виклад основного матеріалу дослідження

Екологічний вплив виробництва фотоелектричних систем залежить від типу вироблених модулів. Незважаючи на екологічну чистоту отриманої енергії, самі фотоелементи містять отруйні речовини, наприклад, свинець, кадмій, галій, миш'як тощо, а їх виробництво споживає масу інших небезпечних речовин.

Сучасні фотоелементи мають обмежений термін служби (30–50 років), і масове застосування поставить в найближчий час складне питання їх утилізації, який теж не має поки прийняттого з екологічної точки зору рішення. Через 30 років експлуатації ефективність фотоелектричних елементів починає знижуватися. Відпрацьовані фотоелементи, хоча і незначна їх

частина, в основному спеціального призначення, містять компонент (кадмій), який неприпустимо викидати на смітник. Потрібно додаткове розширення індустрії по їх утилізації.

Також існують звинувачення представників Грінпісу у тому, що після утилізації сонячних батарей планета несе наслідки, важчі, ніж після вибуху атомної бомби. Як приклад наводиться статистика підприємств із Каліфорнії. За даними від 17-и компаній виробників фотоелементів із 2007 по 2011-й рік 44 заводи створили 46,500 мільйонів фунтів різних відходів, у тому числі брудну воду і мул. Частина відходів утилізується на місці, інша перевозиться у інші переробні цехи (приблизно 1,4 мільйона фунтів бруду). Кількість палива на транспортування, плюс енергія під час утилізації відходів теж приводиться у якості доказів проти масштабного виробництва фотоелементів.

Використані сонячні модулі традиційно відносяться регуляторами до категорії електронного сміття (*e-waste*). Річний світовий обсяг електронного сміття у 2015 склав 43,8 мільйона метричних тонн (оцінка). Прогнозується, що у 2018 році він зросте до 50 млн. тонн. Фотоелектричні панелі сьогодні це всього лише частки відсотка світового обсягу електронних відходів. Так, сонячна енергетика – молода галузь і поки не встигла сильно насмітити. У той же час за один тільки 2017 рік у світі було введено в експлуатацію близько 100 ГВт сонячних електростанцій. Глобальна встановлена потужність зростає експонент-ціально.

У зв'язку із тим, що ціни на компоненти сонячних електростанцій постійно знижуються, витрати на демонтаж об'єктів будуть чинити все більший вплив на економіку проектів, просто за тієї причини, що їх частка у витратах життєвого циклу буде підвищуватися.

У 2016 році була опублікована спільна робота IRENA (Міжнародного агентства відновлюваної енергетики) і MEA (Міжнародного енергетичного агентства) «*End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*», у якій детально описуються технології і стратегії утилізації фотоелектричних модулів [2].

У роботі показано, що до 2030 року у світі утворюється 1,7-8 млн. тонн відходів фотовольтакі (накопиченим підсумком) залежно від розглянутих сценаріїв (*regular loss* – використання модулів протягом 30-річного терміну служби, *early loss* – раннє закінчення року служби за різних причин, наприклад, заміна морально застарілого обладнання на більш сучасне). Така кількість «сонячного сміття» відповідає 3-16 % сьогоденного річного обсягу електронних відходів. До 2050 обсяги (накопиченим підсумком) сонячних панелей, які відслужили свій термін, виростуть значно – до 60-78 млн. тонн (рис. 1).

Вчені вважають, що згенерована на основі сонячного випромінювання енергія зможе до 2050 року забезпечити 20–25 % потреб людства у енергії та скоротить викиди вуглекислоти. Як вважають експерти Міжнарод-

ного енергетичного агентства (IEA), сонячна енергетика вже через 40 років у разі відповідного рівня поширення передових технологій буде виробляти близько 9 тисяч терават-годин – або 20–25% всієї необхідної електрики, і це забезпечить скорочення викидів вуглекислого газу на 6 млрд. тонн щорічно [2].

Експерти вважають, що кількість відходів суттєво збільшиться після 2020 року (табл. 1).

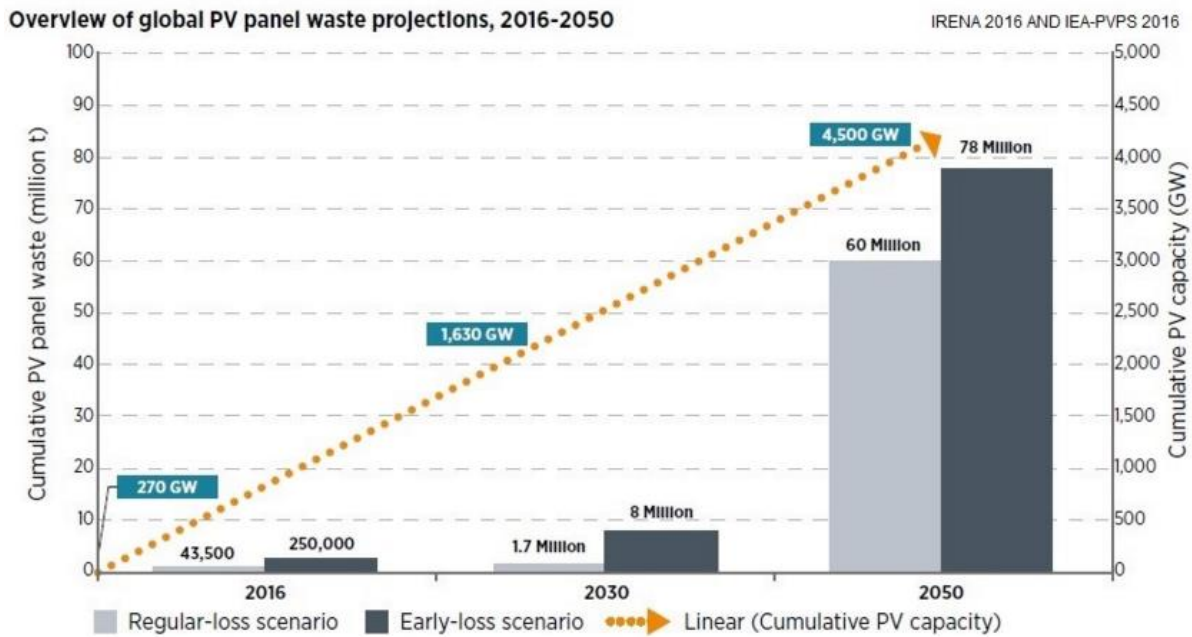


Рис. 1. Динаміка потужності фотопанелей [2]

Таблиця 1.

Оціночна кількість відходів від сонячних енергоустановок, тонн

2013 р	2014 р	2015 р	2020 р	2030 р
11439	13866	16706	35397	132750

IRENA вважає, що річний обсяг відходів відпрацьованих сонячних панелей у 2050 році (5 млн. тонн) буде відповідати приблизно 10 % всього електронного сміття, утвореного на землі у 2014 році. Тобто прогнозований обсяг «сонячних відходів» значний, але він все-таки буде складати лише незначну частку всіх електронних відходів (*e-waste*).

До слова, у роботі прогнозується, що глобальна встановлена потужність сонячної енергетики досягне до 2050 року 4500 ГВт (проти 400 ГВт сьогодні).

У більшості країн сонячні панелі класифікуються як загальні або промислові відходи, управління ними здійснюється відповідно до звичайних вимог, що стосуються обробки та утилізації відходів. Крім такого універсального регулювання, розробляються добровільні і нормативні підходи для спеціального управління «сонячним сміттям».

У Європейському Союзі існують два законодавчі акти, які могли б впливати на фотоелектричну індустрію. Це Закон про відходи виробництва електричного та електронного устаткування – *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)* і Правила поводження із небезпечними матеріалами – *Regulation of Hazardous Substances*. Жоден із цих документів не регулює діяльність у виробництві фотоелектричних систем [3]. Однак, деякі країни самостійно приймають закони про переробку відходів, у тому числі від сонячної електроенергетики [3].

Директива *WEEE (Waste Electrical & Electronic Equipment)* зобов'язала двадцять п'ять країн, які у той час були членами ЄС, втілити її вимоги у національних законах до 13 серпня 2004 року. Зробити це до встановленого терміну встиг лише Кіпр. До 13 серпня 2005 року усі країни-члени (окрім Великої Британії) запровадили принаймні основні вимоги. У закони Великої Британії вимоги Директиви *WEEE* були втілені у 2007 році. Оскільки у різних країнах процес втілення вимог Директиви *WEEE* відбувався по-різному, у країнах Європи виникло чимало різних проблем, пов'язаних із втіленням цих вимог та їх відповідністю національним законам.

Італія вже прийняла закон, що вимагає, щоб її компанії займалися рециклінгом відходів, починаючи із 2012 року. Багато виробників сонячної енергії в Європейському Союзі взяли на себе зобов'язання щодо добровільної переробки відходів від своєї діяльності.

13 серпня 2012 року були прийняті поправки до Директив *WEEE*, які вимагають внесення поправок в національні законодавства про обов'язкову переробку фотоелектричних елементів. Модулі повинні утилізуватися відповідно до Директиви про відходи електричного та електронного обладнання (*WEEE*) (2012/19/EU). Із 2012 року положення Директиви *WEEE* були включені до національного законодавства країнами-членами ЄС, створивши перший ринок, на якому переробка сонячних модулів обов'язкова.

Сьогодні в Європі витягується для повторного використання 65-70 % (по масі) матеріалів, із яких складаються сонячні модулі, що відповідає Директиві ЄС *WEEE*. *CENELEC*, Європейський комітет зі стандартизації електротехніки, розробив додатковий стандарт для збору і переробки панелей (*EN50625-2-4* та *TS50625-3-5*). У стандарті вказані різні адміністративні, організаційні та технічні вимоги, спрямовані на запобігання забруднення і неналежного поводження, мінімізацію викидів, сприяння збільшенню частки відновлених матеріалів і операцій із глибокої переробки. Він також перешкоджає відвантаженню модулів-відходів на об'єкти, які не відповідають стандартним вимогам охорони навколишнього середовища і здоров'я [4].

Стандарт включає конкретні вимоги щодо очищення відходів, відповідно до яких вміст небезпечних речовин у фракціях не повинен перевищувати таких граничних значень:

- кадмій: 1 мг/кг (суха речовина) (кремнієві модулі); 10 мг/кг (суха речовина) (не кремнієві модулі);
- селен: 1 мг/кг (суха речовина) (кремнієві модулі); 10 мг/кг (суха речовина) (не кремнієві модулі);
- свинець: 100 мг/кг (суха речовина).

У Сполучених Штатах утилізація панелей регулюється Законом про збереження та відновлення ресурсів (*Resource Conservation and Recovery Act*), який є правовою основою для управління небезпечними та безпечними відходами. У 2016 році Асоціація сонячної енергетики США (*SEIA*) у партнерстві із виробниками сонячних модулів та монтажними організаціями запустила національну програму добровільної утилізації панелей, яка спрямована на те, щоб зробити ефективні рішення по переробці більш доступними для споживачів.

У Японії відпрацьовані сонячні панелі підпадають під загальні регламенти з управління відходами (*Waste Management and Public Cleansing Act*). У 2015 році була розроблена дорожня карта для просування схеми збору, переробки та належного поводження із обладнанням відновлюваної енергетики із вичерпаним терміном експлуатації.

У 2017 році японська Асоціація сонячної енергетики (*Japan Photovoltaic Energy Association – JPEA*) опублікувала керівництво щодо належного поводження із сонячними модулями після закінчення терміну їх служби (документ має рекомендаційний характер). Додатково, Національний інститут передових промислових наук і технологій (*NEDO*) розробляє технологію переробки.

У Китаї поки немає спеціальних правил по утилізації сонячних модулів. У рамках Національної науково-технічної програми протягом 12-ої п'ятирічки фінансувалися дослідження і розробки у галузі поводження із «сонячними відходами» [5].

В Індії відходи фотоелектричної енергетики знаходяться у веденні Міністерства навколишнього середовища, лісів та зміни клімату відповідно до Правил поводження із твердими відходами 2016 року і Правилами поводження із небезпечними і іншими відходами (управління і транскордонне переміщення).

На міжнародному рівні новий стандарт лідерства в області екологічної стійкості для фотоелектричних модулів (*NSF 457 – Sustainability Leadership of Photovoltaic Modules*) включає критерії управління цими виробами після закінчення терміну їх експлуатації.

Сьогодні багато виробників вже пропонують послуги із утилізації випущених ними сонячних модулів і створюють спеціалізовані підприємства по їх переробці. Тут діє принцип «розширеної відповідальності виробника» (*extended-producer-responsibility*), яка виходить за рамки стадій продажу та експлуатації, і охоплює також стадію поводження із продуктом після завершення його терміну служби.

Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC – коаліція із сонячної токсичності силіконової долини) стверджує, що для того, щоб сонячна енергія посправжньому була «зеленою», виробники сонячних батарей повинні скорочувати та у кінцевому підсумку повністю відмовитися від використання токсичних матеріалів у виробництві.

Необхідно застосування новітніх технологій і методологічних підходів у галузі поводження із відходами, у тому числі і сонячних батарей, що дозволить підприємствам більш успішно реалізовувати свої екологічні проекти, а також створити діловий майданчик для обміну новітніми розробками і досвідом у галузі переробки вторинного матеріалу.

Сам процес переробки фотомодулів сонячних батарей виглядає наступним чином:

- спочатку модулі поділяються на шматки, потім переробляються у спеціальному млині до фракції із частинками розміром менше 5 мм;
- напівпровідникова плівка видаляється у процесі вилуговування, який займає приблизно 4 – 6 годин;
- скло відділяється від рідини у сепараторі;
- потім матеріал потрапляє на вібросито, який остаточно розділяє етиленові і вінілацетатні фракції від скла, яке потрапляє на очистку методом полоскання;
- після очищення скло поміщається в контейнери для подальшої утилізації, а вода після промивання скла фільтрується для вилучення металів;
- з'єднання металів випадають ув осад у процесі вилуговування із використанням гідроксиду натрію. Після цього вони можуть бути використані у напівпровідниковому виробництві, у тому числі виробництві нових сонячних батарей [6].

Можливості переробки залежить від виду технології, використовуваної у сонячних модулях:

- Сонячні батареї на основі кремнію

Підготовча фаза включає вилучення рами та розподільчого коробу вручну перед початком процесу переробки сонячного модуля. Модуль потім подрібнюють у млині та різні фракції розділяють. Вихідними фракціями є чорні й кольорові метали, скло, кремній і пластмаса. За допомогою даного методу переробки можна відновити більше 80 % початкової ваги сонячної батареї.

- Сонячні модулі не на основі кремнію

Вони вимагають застосування спеціальних технологій переробки, таких як використання хімічних ванн для того, щоб відокремити різні напівпровідникові матеріали. Процес переробки модулів на основі телуриду кадмію починається шляхом дроблення модулів і потім розподілу різних фракцій.

Цей процес переробки призначений для відновлення до 90 % скла і 95 % напівпровідникових матеріалів, що містяться у сонячних батареях.

Кремній із відпрацьованих сонячних батарей переробляється на установці компанії *Solar World*. Оскільки відсутня єдина система приймання відпрацьованих сонячних панелей на завод–виготовлювач, розвиток ринку переробки тільки починається.

Наприклад, американська *First Solar* ще у 2005 році створила глобальну програму зі збору та переробки своїх сонячних модулів (тонкоплівкові панелі *CdTe*). Технологія дозволяє забезпечити повторне використання 90 % напівпровідникових матеріалів і скла. З 2018 р. переробні підприємства компанії працюють із нульовим стоком рідких відходів.

Така політика виробників обумовлена не тільки постійним посиленням вимог регуляторів або «підвищеною соціальною відповідальністю». Переробка сонячних модулів не позбавлена економічного сенсу.

Таким чином, вже під час розробки нової технології виробництва сонячної енергії, важливо розглядати, як ці матеріали і з'єднання можуть бути демонтовані і повторно використані.

Наприклад, органічні фотоелектричні елементи наносяться на скло, пластик або папір. Кожен із цих матеріалів має свої мінуси: неможливість ефективної переробки, низька екологічність, обмежена продуктивність тощо. Нова технологія (використання наноматеріалів на базі целюлози із деревини) є самою екологічною й ефективною.

Дослідники розробили сонячні батареї із використанням природних субстратів, отриманих із деревини [4]. Ці субстрати були перероблені у целюлозні нанокристали (*Cellulose Nanocrystal; CNC*), із яких вчені створили оптично прозору (як лист) підкладку. Світло легко проходить через цей матеріал, а потім він поглинається дуже тонким шаром органічного напівпровідника [7].

Нова органічна сонячна батарея поки досягає ефективності перетворення 2,7 %, що, тим не менш, є безпрецедентно високим показником для фотоелементів, виконаних із матеріалу, який повністю розкладається. Такі фотоелектричні елементи можуть бути швидко перероблені за допомогою води наприкінці їх життєвого циклу.

Під час процесу переробки, сонячні батареї занурюються у воду за кімнатної температури. Через кілька хвилин субстрат *CNC* розчиняється, і фотоелектричні елементи можуть бути легко розділені на основні компоненти. Підвищення вмісту органічних елементів у сонячних батареях допоможе вирішити одвічну дилему: як зробити так, щоб за допомогою фотогальванічних елементів перестати бути залежними від неекологічних горючих видів палива, і у той же час створенням таких елементів не забруднювати навколишнє середовище.

Сьогодні відходи сонячних електростанцій не є значущою світовою проблемою, оскільки їх обсяги малі – частки відсотка електронного сміття

(*e-waste*), що утворюється на планеті щороку. Тому, відповідно до приказки «готуй сані влітку ..», завдання ефективної переробки сонячних модулів після закінчення терміну їх використання вже ґрунтовно опрацьована.

Висновки

Незважаючи на екологічну чистоту отримуваної енергії, самі фотоелементи містять отруйні речовини, наприклад, свинець, кадмій, галій, миш'як. Сучасні фотоелементи мають обмежений термін експлуатації (30-50 років), їх активне застосування передбачатиме виникнення проблеми їх утилізації. Тому останнім часом починає активно розвиватися виробництво тонкоплівкових фотоелементів, у складі яких міститься близько 1 % кремнію, завдяки чому вони дешевші у виробництві, але поки мають меншу ефективність.

Список використаної літератури

1. Офіційний сайт environmentalprogress.org/
2. End of life management solar photovoltaic panels. – [Електроний ресурс]. – Режим доступа: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf
3. Кучеров А. В., Шибилева О. В. Использование солнечных батарей с учетом рециклинга // Молодой ученый. — 2014. — №11. — С. 166-168.
4. Кучеров А. В. Сравнительный технико-экономический анализ альтернативных источников энергии России / А. В. Кучеров, О. В. Шибилева // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2012.- № 03.- С. 108–111.
5. Рустамов Н. А. Стандартизация и нетрадиционная энергетика / Н. А. Рустамов, Т. И. Андреев, К. В. Чекарев // ЭСКО Электронный журнал энергосервисной компании «Экологический систем», 2007. — № 6(6).
6. Дмитриков В. П., Падалка В. В., Проценко О. В., Коломєєц В. І., Переробка відпрацьованих свинцево-кадмієвих гальванічних елементів; Повідомлення 1: Принципи і процеси переробки // ВІСНИК Полтавської державної аграрної академії. - Полтава, 2013. - Вип. 2. - С. 123-126.
7. Для переработки солнечных панелей из древесины достаточно простой воды // <http://greenevolution.ru/2013/04/02/dlya-pererabotki-solnechnyx-panelej-iz-drevesiny-dostatochno-prostoj-vody/>.