

КАТЕНІН Вадим

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ORCID: [0000-0002-6609-2652](https://orcid.org/0000-0002-6609-2652)e-mail: vadym.katenin@mit.khpi.edu.ua

САМОЙЛЕНКО Наталія

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ORCID: [0000-0003-0306-8425](https://orcid.org/0000-0003-0306-8425)e-mail: samoilenko@kpi.kharkov.ua

СУЧАСНИЙ СТАН ОПЕРАЦІЙ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ В УКРАЇНІ

У роботі проаналізовано стійку тенденцію розвитку сонячної енергетики, що супроводжується утворенням і накопиченням відходів сонячних панелей. Цей процес вимагає застосування досконалого управління відходами та розробки технологій їх утилізації. Зазначено, що проблема відходів сонячних фотоелектричних панелей набуває більшої актуальності через військові дії, що відбуваються на території України. Неоднорідність матеріалів фотоелектричних панелей призводить до неоднозначної класифікації та передбачає поєднання безпечних і небезпечних складових. Визначено, що відходи фотоелектричних панелей можна поділити на два класи безпеки: небезпечні відходи та відходи, що не є небезпечними. Охарактеризовано основні моменти утилізації непридатних для використання фотоелектричних панелей з відновленням ресурсоцінної сировини. Зазначено, що є значні відмінності у матеріальній складовій панелей із кристалічного кремнію та тонкопліткових модулів. Визначено, що на сьогодні розрізняють два види переробки PV-модулів – грубу та тонку, а загалом операції утилізації відходів фотоелектричних панелей поєднують механічні та хімічні процеси вилучення матеріалів. Недосконалість законодавчо-нормативної та інформаційної бази, небезпека утворення та накопичення відходів, проблеми моніторингу, повільний розвиток процесів організації процесів збирання, накопичення та передачі відходів, а також недостатність пропозицій щодо способів переробки відходів фотоелектричних панелей як ресурсоцінної сировини визначні як основні проблеми у сфері управління відходами фотоелектричних панелей в Україні.

Ключові слова: сонячні фотоелектричні панелі, утилізація, відходи, управління відходами.

KATENIN Vadym, SAMOILENKO Nataliia
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

CURRENT STATE OF SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS WASTE MANAGEMENT OPERATIONS IN UKRAINE

The paper analyzes the steady trend of solar energy development, which is accompanied by the formation and accumulation of solar panel waste. This process requires the application of accomplished waste management and the development of waste disposal technologies. It was determined that the problem of waste solar photovoltaic panels becomes more urgent due to the military actions taking place on the territory of Ukraine. The general characteristics of waste for different types of panels are given. The heterogeneity of the materials of photovoltaic panels leads to an ambiguous classification and involves a combination of safe and dangerous components. It has been determined that photovoltaic panel waste can be divided into two hazard classes: hazardous waste and non-hazardous waste. The key points of solar panel waste management operations are characterized in accordance with the Law of Ukraine "On Waste Management" and EU Legislation. The main points of disposal of unusable photovoltaic panels with recovery of valuable raw materials are described. It is noted that there are significant differences in the material composition of crystalline silicon panels and thin film modules. It is noted that two processing types of PV modules are currently distinguished - coarse and fine, and the most effective steps in the preparatory stage of disposal are also determined. In general, PV panel waste disposal operations combine mechanical and chemical material extraction processes. The imperfection of the legislative and regulatory framework in the field of waste management, the increase in the ecological danger of the generation and accumulation of waste, the imperfection of the information base and waste monitoring, the insufficient development of the processes of organizing the processes of collection, accumulation and transfer of waste for disposal, the insufficiency of proposals for methods of processing and disposal of solar panels waste as a valuable resource of secondary raw materials are notable as the main problems in the field of waste management of photovoltaic panels in Ukraine. One of the main tasks for development is to increase the share of waste materials that are currently not disposed of, but can be used as secondary raw materials.

Key word: solar photovoltaic panels, recycling, waste, waste management.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Тенденція до скорочення використання мінеральних енергетичних ресурсів та розвиток сонячної енергетики у багатьох країнах світу є послідовною та сталою. У цьому зв'язку виробництво і використання сонячних фотоелектричних панелей (СФЕП) з кожним роком збільшується. Так, у 2021 році у світі було встановлено щонайменше 175 гігават фотоелектричних систем, що майже на 18% більше ніж у 2020 році та у 10 разів більше ніж у 2010 [1]. Водночас цей процес супроводжується підвищенням екологічної безпеки утворення і накопичення сонячних фотоелектричних панелей і вимагає застосування досконалого управління відходами та розробки технологій їх утилізації.

Відходи СФЕП використовуються у якості цінної сировини для виготовлення нових сонячних панелей або електронних пристроїв, що в цілому дозволяє знизити витрати енергії і матеріалів на виготовлення нової продукції, а також зменшити негативний вплив виробництва СФЕП на довкілля.

За оцінками, до 2050 року загальний обсяг відходів фотоелектричної енергії може досягти 78 мільйонів метричних тон. При цьому сировина, отримана з панелей, може скласти вартість 450 млн дол. США до 2030 року і перевищувати 15 млрд дол. США до 2050 [2].

Донедавна відходи сонячних фотоелектричних панелей, в основному, являли собою відпрацьовані чи пошкоджені конструкції [3]. Військові дії, що відбуваються на території України і супроводжуються руйнуванням інфраструктури, породжують відходи війни, серед яких мають місце і відходи СФЕП. При розбиранні завалів такі панелі надходять у цикл будівельних відходів, з яких їх потрібно вилучати, демонтувати та направляти на утилізацію. Даний факт посилює актуальність питань, що стосуються екологічно безпечного управління будівельними відходами взагалі та відходами сонячних фотоелектричних панелей зокрема.

Важливим аспектом в управлінні відходами СФЕП є виважені, науково та практично обґрунтовані дії щодо кожної операції поводження з відходами, які повинні актуалізуватись та корегуватись відповідно вимог екологічної безпеки.

Аналіз досліджень та публікацій

Стійка тенденція щодо збільшення кількості фотоелектричних сонячних панелей підвищує актуальність теми та відповідно кількість публікацій стосовно поводження з ними. При цьому основні дослідження присвячуються питанням операції утилізації панелей. Так, International Energy Agency [1] та International Renewable Energy Agency [2] публікують регулярні звіти по темі сучасних технологій рециклінгу сонячних панелей. Авторами [4, 5] аналізуються різні підходи до утилізації СФЕП та представляються висновки щодо екологічної та економічної доцільності відмінних методів. Акцентується увага на перевагах повного екологічно-свідомого циклу використання сонячних панелей перед традиційними підходами [6]. У публікаціях вітчизняних дослідників визначається актуальність питання утилізації фотоелектричних модулів, створення функціональної структури зі збору та переробки фотоелектричних модулів із застосуванням новітніх технологій і методологічних підходів поводження із подібними відходами [7].

Водночас у публікаціях мало уваги привертається актуальним питанням, що розглядають поводження з відходами сонячних фотоелектричних панелей не тільки в операціях утилізації, але й іншим операціям щодо поводження з відходами СФЕП.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є оцінка стану утворення відходів сонячних фотоелектричних панелей та аналіз досконалості операцій поводження з відходами в Україні.

Виклад основного матеріалу

Структура фотоелектричних панелей характеризується використанням різного роду матеріалів: металу, скла, пластику та матеріалів фотоелектричного елементу. В залежності від типу останній може являти собою кристалічні монокристалічні чи багатокристалічні кремнієві пластини, а також тонкоплівкові елементи - аморфний кремній, телурид кадмію, мідний селенід індію галію. Проводяться дослідження за нанотехнологіями щодо застосування фосфіду індію галію, арсеніду галію та ін. [8]. Крім того, панелі можуть містити германій та селен [9].

Найбільш розповсюдженими є фотоелектричні панелі на основі кремнію, для виготовлення яких на практиці використовуються досить досконалі технології, що сприяє насиченню ринку цією продукцією та важливій позиції у відновлювальній енергетиці. У цьому зв'язку відходи фотоелектричних панелей, в основному, формуються кремнієвими СФЕП.

Метал у переважній більшості СФЕП представлений рамами з анодованого чи порошкового алюмінію, а також міддю в електричній частині. Кожна фотоелектрична панель у своїй конструкції має шар загартованого скла, плівку для ламінування з етиленвілацетату (EVA – плівка), а також пластику як допоміжного матеріалу при кріпленні елементів СФЕП.

Зважаючи на неоднорідність матеріалів, з яких виготовлені СФЕП, їх відходи класифікуються неоднозначно та передбачають поєднання у своїй конструкції безпечних і небезпечних для довкілля складових. Найбільшу небезпеку для довкілля являють собою тонкоплівкові СФЕП, що включають такі сполуки як телурид кадмію, мідний селенід індію галію. В умовах холодного клімату СФЕП виготовляють з використанням антифризових рідин, які є також небезпечними. У порівнянні з тонкоплівковими відходи кремнієвих СФЕП вважаються значно безпечнішими для довкілля.

У відповідності з прийнятим законом України «Про управління відходами» управління відходами – це комплекс заходів із збирання, перевезення, оброблення (відновлення, у тому числі сортування, та видалення) відходів, включаючи нагляд за такими операціями та подальший догляд за об'єктами видалення відходів [10].

Кожна операція даного комплексу виконується у відповідності з нормативними вимогами, що необхідні для здійснення відповідної їй діяльності. Так, інструкція по збору і транспортуванню відходів, якою керуються на підприємстві, передбачає комплекс заходів безпеки щодо зниження (повного виключення) негативного впливу на довкілля і людину діяльності при збиранні, тимчасовому зберіганні та видаленні відходів.

У загальному випадку збирання відходів передбачає операцію щодо вилучення, накопичення, зберігання, перевезення відходів на об'єкти оброблення відходів (або від одного об'єкта до іншого), яка здійснюється суб'єктами господарювання у сфері управління відходами. Зберігання відходів потребує їх утримання в умовах, безпечних для здоров'я людей та навколишнього природного середовища та з дотриманням відповідних екологічних вимог.

Основним фактором, що впливає на операції управління відходами, є їх ідентифікація, що включає віднесення до певного виду відходів. Для відходів СФЕП можуть бути визначені два класи небезпеки: небезпечні відходи та відходи, що не є небезпечними. Водночас, зважаючи на комплексність матеріалів, з яких виготовлено СФЕП, в одній панелі після розбирання на складові можуть бути елементи, що відносяться до різних класів відходів.

Законодавством ЄС передбачається віднесення відходів СФЕП до відходів електричного та електронного обладнання [11]. При цьому таке обладнання визначається як обладнання, належне функціонування якого залежить від електричного струму й електромагнітних полів, та обладнання для генерування, передачі та виміру такого струму й полів, призначене для використання з номінальною напругою не вище 1000 вольт для змінного струму та 1500 вольт для постійного струму.

В Україні електричні та електронні відходи входять в окрему групу, але безпосередньо відходи СФЕП в ній не зазначаються. У відповідності з Державним класифікатором відходів ДК 005-96 відходи СФЕП можливо ідентифікувати за різними групами: розділом Б.1. (група 40, код 4010.2.9.12) та розділом Б.6 (група 77, код 7740.3.1.03). У теперішній час розглядається проект національного класифікатора НК 005:2021 «Класифікатор відходів». Передбачається відповідність позицій відходів класифікатора європейському переліку відходів. Логічним є віднесення відходів СФЕП до групи електричних та електронних відходів.

У комплексі заходів управління відходами має місце видалення відходів, тобто здійснення операцій з відходами, яка не передбачає їх утилізацію через відсутність відповідної технології. Згідно нормативного порядку утилізація небезпечних відходів здійснюється спеціалізованими підприємствами, що мають відповідну ліцензію. Стосовно відходів СФЕП дана операція має обмежене застосування, так як переважна більшість панелей використовується повторно чи утилізується.

Переробка відходів СФЕП застосовується у випадку потенційної можливості продовжити термін експлуатації панелей, що вже закінчився, або панель була пошкоджена. Проводиться очищення конструкції (ремонт) та тестування характеристик панелі, після чого СФЕП може бути повторно використати.

Утилізація непридатних для використання СФЕП проводиться для панелей різних типів, в першу чергу кремнієвих, які складають майже 90% відходів. Водночас, слід відзначити, що частина непридатної для використання панелі (до 15%) після розбирання не піддається утилізації [2, 12]. Таким чином, при проведенні процесу утилізації СФЕП утворюється вторинна сировина (скло, напівпровідникові матеріали і метали) та відходи.

До складу сонячних модулів входить ресурсоцінна сировина, склад якої у панелях варіюється. Так, у відсотковому співвідношенні панель із кристалічного кремнію – це 76% скла, 10% полімерних матеріалів, 8% алюмінію, 5% кремнієвих напівпровідників, 1% міді, менше 0,1% срібла, олова та свинцю. У тонкоплівкових модулях частка скла набагато вище – 89% (CIGS) і 97% (CdTe) [5].

На сьогоднішній день розрізняють два види переробки PV-модулів – грубу та тонку. При першій здійснюється витяг основних матеріалів модуля: алюмінію, міді, скла; пластмаса ж термічно розкладається. При другій переробці можливе вилучення всіх хімічних елементів з фотоелементу панелі.

На підготовчій стадії до утилізації відходів використовують різні технологічні прийоми, що дозволяють відокремити основні частини конструкції. Звичайно послідовність операцій така:

1. Знімання захисної алюмінієвої рами з модуля.
2. Відокремлення розподільчої коробки.
3. Вилучення скла з кремнієвим сонячним елементом.
4. Відділення елементів панелі, що містять кремній та метали.

Вилучена алюмінієва рама направляється на переформування каркасів панелей. Великий відсоток скла можливо утилізувати, але при цьому виникають проблеми щодо якості матеріалу та можливого його забруднення домішками. Подальше механічне відділення елементів панелі потребує термічної обробки при температурі не нижче 500° С. У даному процесі проходить випарювання пластику, який використовувався для герметизації панелі. Операції щодо вилучення цінних матеріалів (кремнію, срібла, напівпровідникових елементів) виконуються із застосуванням хімічних процесів.

Таким чином, операції утилізації відходів СФЕП поєднують механічні та хімічні процеси вилучення матеріалів. При цьому підвищення рівня екологічної безпеки починається при термічному нагріванні та супроводжує етапи операцій щодо хімічних впливів на частину кремнієвих елементів панелі.

Основними проблемами у сфері управління відходами СФЕП в Україні є:

- недосконалість законодавчо-нормативної бази у сфері управління відходами;
- підвищення екологічної безпеки утворення та накопичення відходів, у тому числі тих, що входять у склад категорії відходів війни;
- недосконалість інформаційної бази та моніторингу відходів,
- недостатній розвиток процесів організації процесів збирання, накопичення та передачі відходів на утилізацію;

- недостатність пропозицій щодо способів екологічно безпечної переробки та утилізації відходів СФЕП як ресурсоцінної вторинної сировини.

Провідну роль у вирішенні даних проблем має нормативна складова. Законодавча база в Україні у сфері управління відходами у теперішній час удосконалюється шляхом прийняття закону та підзаконних нормативно-правових актів, які направлені на підвищення екологічної безпеки на всіх операціях поводження з ними, що в тому числі включають відходи СФЕП. Прийнятий закон України «Про управління відходами», який набирає чинності з 09.07.2023 р. [9], визначає основні напрямки діяльності щодо запобігання негативного впливу відходів на здоров'я людей та навколишнє природне середовище. Положення закону розглядаються у сфері права, організаційних та економічних засад щодо управління відходами, а також сприяння підготовці відходів до повторного використання, рециклінгу та відновленню.

Національною стратегією управління відходами до 2030 року та Національним планом управління відходами до 2030 року [13] визначаються напрямки розвитку управління відходами та узгоджуються національна політика і стратегія планування управління відходами з європейськими підходами. Розглядається впровадження економічних інструментів для удосконалення управління відходами, зокрема, запровадження економічного стимулювання впровадження екологічно чистих технологій виробництва та розширення можливостей перероблення (рециклінгу). В управлінському аспекті планується вдосконалення інституційної структури сфери управління відходами. Планується реформування системи інформаційного забезпечення сфери управління відходами з утворенням інформаційного центру для збирання, оброблення, аналізу та поширення інформації про управління відходами. Значна увага приділяється управлінню небезпечними відходами. Важливим є окремий підрозділ в документі, в якому розглядається формування державної політики у сфері управління відходами електричного та електронного обладнання. Планується розробка законопроекту про відходи електричного та електронного обладнання, встановлення вимог до збирання, зберігання та оброблення електричного та електронного обладнання, а також прийняття національних стандартів для відходів електричного і електронного обладнання. Передбачається створення інфраструктури для збирання та оброблення для відходів електричного та електронного обладнання та ін.

Що стосується недостатності пропозицій щодо способів переробки та утилізації відходів СФЕП, то слід зазначити, що процес утилізації даних відходів з точки зору запропонованих та запроваджених технологій навіть у розвинених країнах світу не є досконалим. Самою оптимістичною оцінкою щодо всіх панелей передбачається, що рівень збору складе 85%, а відновлення відновлення складових елементів – 95 % [8]. Безперечно, що дослідження у сфері використання відходів СФЕП як вторинної сировини потребують розширення та практичного використання. При цьому однією із головних задач є підвищення частки матеріалів відходів, для які у теперішній час не утилізуються, але можуть бути використані як вторинна сировина.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Масштабування та популяризація виробництва енергії шляхом сонячної генерації в світі призводить до підвищення актуальності питання переробки відпрацьованих панелей. Фотоелектричні панелі містять різні за класом небезпеки речовини і в Україні однозначно не ідентифікуються. Такий стан впливає на чіткість проведення процедур поводження з відходами та потребує нормативного регулювання.

Відходи СФЕП відносяться до ресурсоцінних, а отже операції з їх утилізації повинні розширюватись та удосконалюватись. Це передбачає утилізацію частини відходів, які у теперішній час не залучені у даний процес, та підвищення екологічної безпеки операцій вилучення цінних металів та кремнію.

Провідну роль у вирішенні проблем щодо операцій поводження з відходами сонячних фотоелектричних панелей має відігравати нормативна база. Особливо актуальним в Україні є розробка нормативних та методичних основ щодо операцій поводження з відходами СФЕП, що входять в категорію відходів війни

Література

1. Masson, Gaetan & Bosch, Elina & Kaizuka, I. & Jäger-Waldau, Arnulf & Donoso, José. (2022). Snapshot of Global PV Markets 2022 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS.
2. IRENA, IEA-PVPS. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016. Available from: <http://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>.
3. Самойленко Н. М. Переробка та утилізація фотоелектричних сонячних панелей / Н. М. Самойленко, В. Д. Катенін, А. О. Баранова // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : New solutions in modern technology : col. of sci. papers. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 2 (8). – С. 121-126.
4. Weckend Stephanie, Wade Andreas, Heath Garvin A. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. United States. 2016. doi: 10.2172/1561525.
5. Komoto K, Lee J-S, Zhang J, Ravikumar D, Sinha P, Wade A, Heath GA. End-of-life management of photovoltaic panels: trends in PV module recycling technologies. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO, 2018.

6. Tsang M., Sonnemann G., Bassani D. Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. No 156. P. 37-48.

7. Пундєв В. О. Утилізація фотоелектричних модулів. Проблеми та міжнародний досвід / В. О. Пундєв, В. Ф. Резцов, Т. В. Суржик, В. І. Шевчук, І. О. Шейко // Відновлювана енергетика. – 2020. – № 3. – С. 27-34. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2020_3_6.

8. Giurco D., Dominish E., Florin N., Watari T., McLellan B. Requirements for Minerals and Metals for 100% Renewable Scenarios. In: Teske S. (eds) *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Springer, Cham. 2020, P. 437-457. doi: 10.1007/978-3-030-05843-2_11.

9. Stamford L., Azapagic A. Environmental impacts of copper- indium-gallium-selenide (CIGS) photovoltaics and the elimination of cadmium through atomic layer deposition. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 688. P. 1092-1101. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.343.

10. Про управління відходами : закон України від 20.06.2022 № 2320-IX. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>

11. European Union. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*. 2012;197:38-71.

12. IRENA. Future of solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper). Abu Dhabi. International Renewable Energy Agency. 2019. 73 pp.

13. Про внесення змін до деяких актів Кабінету Міністрів України з питань діяльності Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів. Постанова Кабінету Міністрів України від 09.09.2020 № 826. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/826-2020-p#Text>

References

1. Masson, Gaetan & Bosch, Elina & Kaizuka, I. & Jäger-Waldau, Arnulf & Donoso, José. (2022). Snapshot of Global PV Markets 2022 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS.

2. IRENA, IEA-PVPS. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016. Available from: <http://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>.

3. Samoilenko N. M. Pererobka ta utylizatsiia fotoelektrychnykh soniachnykh panelei / N. M. Samoilenko, V. D. Katenin, A. O. Baranova // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*. Ser. : Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh : zb. nauk. pr. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : New solutions in modern technology : col. of sci. papers. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2021. – № 2 (8). – S. 121-126.

4. Weckend Stephanie, Wade Andreas, Heath Garvin A. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. United States. 2016. doi: 10.2172/1561525.

5. Komoto K, Lee J-S, Zhang J, Ravikumar D, Sinha P, Wade A, Heath GA. End-of-life management of photovoltaic panels: trends in PV module recycling technologies. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO, 2018.

6. Tsang M., Sonnemann G., Bassani D. Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. No 156. P. 37-48.

7. Пундєв В. О. Утилізація фотоелектричних модулів. Проблеми та міжнародний досвід / В. О. Пундєв, В. Ф. Резцов, Т. В. Суржик, В. І. Шевчук, І. О. Шейко // Відновлювана енергетика. – 2020. – № 3. – С. 27-34. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2020_3_6.

8. Giurco D., Dominish E., Florin N., Watari T., McLellan B. Requirements for Minerals and Metals for 100% Renewable Scenarios. In: Teske S. (eds) *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Springer, Cham. 2020, P. 437-457. doi: 10.1007/978-3-030-05843-2_11.

9. Stamford L., Azapagic A. Environmental impacts of copper- indium-gallium-selenide (CIGS) photovoltaics and the elimination of cadmium through atomic layer deposition. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 688. P. 1092-1101. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.343.

10. Про управління відходами. Закон України; Перелік від 20.06.2022 № 2320-IX. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>

11. European Union. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*. 2012;197:38-71.

12. IRENA. Future of solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper). Abu Dhabi. International Renewable Energy Agency. 2019. 73 pp.

13. Про внесення змін до деяких актів Кабінету Міністрів України з питань діяльності Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів. Постанова Кабінету Міністрів України від 09.09.2020 № 826. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/826-2020-p#Text>

Надійшла/Paper received : 23.09.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.