

УДК 504.062.2

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.17

ПЕРЕРОБКА ТА УТИЛІЗАЦІЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Н. М. САМОЙЛЕНКО, В. Д. КАТЕНІН*, А. О. БАРАНОВА

кафедра хімічної техніки та промислової екології, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: vadimkatenin1@gmail.com

АНОТАЦІЯ Проаналізовано стійку тенденцію нарощування встановленої потужності сонячних електростанцій, що супроводжується поступовим накопиченням відходів сонячних панелей. Визначено основні чинники негативного впливу на довкілля і здоров'я людини виробництва сонячних фотоелектричних панелей та їх відходів. Проаналізовані сценарії накопичення відходів фотоелектричних модулів, охарактеризовані особливості утворення та накопичення відходів у теперішній час та у перспективі. З урахуванням терміну середньої експлуатації сонячних фотоелектричних панелей у 25 років, визначено, що обсяги відходів будуть помітно збільшуватися у період 2030...2035 рр., досягаючи піку між 2040 та 2050 рр. Охарактеризовано тип та склад фотоелектричних панелей, які визначають суть технології переробки відходів. Визначено, що на сьогодні більшість досліджень з переробки відходів сонячних фотоелектричних панелей зосереджено на модулях першого покоління, що пов'язується з масштабами експлуатації даних панелей та ринками продажу. З'ясовано, що у теперішній час виробництво сонячних фотоелектричних панелей, в якому витрачаються первинні природні матеріали, є досить природоємним, а безпосередньо переробка відходів не може задовольнити потреби виробництва фотоелектричних модулів. Обґрунтовується об'єктивна необхідність проведення у великих обсягах видобування корисних копалин та використання запасів цінних металів до настання періоду високоефективної переробки відходів сонячних фотоелектричних панелей, які б відповідали запитам виробництва. Розглянуті сучасні тенденції у технологічних дослідженнях і розробках вторинної переробки фотоелектричних модулів. Визначено, що по мірі збільшення обсягів виробництва сонячних фотоелектричних панелей і утворення відходів, вимоги щодо забезпечення природозберігаючої ефективності технологій переробки та утилізації відходів повинні бути більш жорсткими. Це передбачає підвищення ступеню переробки основних компонентів відходів, починаючи з 80...90 % і до максимально високого рівня. Визначено, що водночас з даною тенденцією, доцільно проводити розробку технологій утилізації не перероблювальних у теперішній час частин відходів.

Ключові слова: відходи сонячних фотоелектричних панелей; вплив на довкілля; накопичення відходів; переробка; утилізація

PROCESSING AND RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELS

N. SAMOILENKO, V. KATENIN, A. BARANOVA

Department of chemical engineering and industrial ecology, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The steady tendency of increasing the installed capacity of solar power plants, which is accompanied by the gradual accumulation of solar panel waste, is analyzed. The main factors of negative impact on the environment and directly on human health from the production of solar photovoltaic panels and waste of these panels are identified. The scenarios of solar photovoltaic panels waste accumulation are analyzed, the specifics of waste generation and accumulation in the present and in the future are characterized. Taking into account the average service life of solar photovoltaic panels in 25 years, it is determined that the amount of waste will increase significantly in the period of 2030...2035, reaching a peak between 2040 and 2050. The type and composition of photovoltaic panels, which determine the essence of waste processing technology, are characterized. It is defined that today most research on waste recycling of solar photovoltaic panels focuses on the first generation of modules, which is associated with the scale of operation of these panels and sales markets. It was found that at present, the production of solar photovoltaic panels, which consumes primary natural materials, is characterized by nature intensity, and direct waste processing cannot meet the needs of the photovoltaic modules production. The objective necessity of carrying out large-scale extraction of minerals and use of precious metals before the period of highly efficient processing of waste solar photovoltaic panels, which would meet the demands of production, is substantiated. Modern tendencies in technological researches and developments of secondary processing of photovoltaic modules are considered. It is determined that as the volume of solar photovoltaic panels production and waste generation increases, the requirements for ensuring the environmental efficiency of waste processing and disposal technologies should be more stringent. This involves increasing the recycling degree of the waste's main components, starting from 80...90 % and to the highest possible level. It is determined that at the same time with this tendency, it is expedient to develop technologies for recycling of non-recyclable parts of waste at present.

Keywords: solar photovoltaic panels waste; environmental impact; waste accumulation; processing; recycling

Вступ

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним використанням відновлюваних джерел енергії. За прогнозами до 2050 р. буде здійснено 100 % перехід до використання

відновлювальної енергетики, причому частка сонячної енергетики складатиме 69 % [1]. Вже до кінця 2018 року загальна встановлена потужність сонячних фотоелектричних батарей досягла 480 ГВт, що є другим за величиною відновлюваним джерелом електроенергії після вітру [2]. У 2020 р. встановлена

потужність вітряних та сонячних електростанцій зросла на 41 %, а їх частка у структурі виробництва енергії – удвічі. Водночас найбільше підвищилась встановлена потужність сонячних електростанцій [3].

Стрімкий розвиток сонячної фотоенергетики супроводжується поступовим накопиченням відходів – сонячних панелей, які відпрацювали свій термін або вийшли з експлуатації за інших причин. Сценарії накопичення відходів показують, що у 2050 році у світі утвориться 78 млн тон відходів від фотоелектричних модулів [4].

З екологічної точки зору виробництво сонячних фотоелектричних панелей (СФП) та їх відходи розглядають як чинник, що негативно впливає на елементи довкілля. Несприятлива дія цієї сфери пов'язується з використанням земельних та водних ресурсів, шкідливих матеріалів, а також викидами забруднюючих речовин, серед яких суттєвим є викид CO₂, що впливає на зміну клімату [5]. Особливою екологічною проблемою є виснаження природних ресурсів при видобуванні мінеральної сировини, у т.ч. металів, що використовуються для виготовлення фотоелектричних панелей.

Відходи фотоелектричних панелей можуть містити важкі метали і їх сполуки, а також телур, галій, сірку тощо. Зазначені забруднюючі речовини та їх з'єднання, які потрапляють у довкілля, приводять до виникнення різних патологічних станів організму людини та тварин. Так, наприклад кадмій негативно впливає на клітини мозку, легенів тощо; свинець знижує індекс інтелектуального розвитку, викликає серцево-судинні захворювання і захворювання нирок та ін.

Нині в Україні відсутні підприємства з переробки фотоелектричних модулів, як і вимоги щодо їх утилізації [4]. Водночас у розвинених країнах світу давно розроблені та практично застосовуються технології утилізації сонячних панелей.

Зважаючи на зазначене, важливим науковим і практичним завданням є дослідження, направлені на аналіз та оцінку технологій утилізації відходів сонячних панелей, поводження з якими в Україні вже незабаром стане значною екологічною проблемою.

Мета роботи

Метою роботи є аналіз утворення відходів сонячних фотоелектричних панелей і технологій переробки та утилізації цих відходів, а також виявлення тенденцій підвищення екологічності поводження з ними.

Для досягнення поставленої мети будуть вирішені наступні задачі:

1. Охарактеризувати процес утворення та накопичення відходів сонячних фотоелектричних панелей у теперішній час та на перспективу.

2. Розглянути сучасні тенденції у технологічних дослідженнях і розробках для вторинної переробки фотоелектричних модулів.

3. Проаналізувати екологічні аспекти переробки та утилізації відходів сонячних фотоелектричних панелей.

4. Визначити тенденції зменшення природоємності технологій виробництва СФП та розробки нових технологій переробки і утилізації відходів.

Виклад основного матеріалу

Утворення та накопичення відходів СФП.

Технології переробки безпосередньо залежать від типу та складу панелей. У теперішній час розрізняють три покоління фотоелектричних панелей:

1. Перше покоління: панелі на основі кристалічного кремнію (c-Si) включають моно- та полікристалічні;

2. Друге покоління: тонкоплівкові панелі на основі аморфного кремнію (a-Si), телуриду кадмію (CdTe), діселеніду міді індію (CIS); селеніду мідного індію галію (CIGS);

3. Третє покоління представлено фотоелектричними концентраторами (CPV) та новими технологіями, що включають панелі на основі CPV-кремнію або III-V сполук; сонячні елементи, сенсibiliзовані фарбами, органічні сонячні елементи, а також тандемні/гібридні комірки (органічні та неорганічні напівпровідники) та кремній – PERC.

Очікується, що у майбутньому ринок СФП значною мірою зміниться. Частка панелей першого покоління до 2030 року зменшиться з 92% до 44,8%, а панелі третього покоління, як передбачається, будуть складати 44,1% [6].

У теперішній час покомпонентний склад СФП характеризується неузгодженістю. Є очевидним, що в міру того як розвиваються нові технології, частка таких компонентів як срібло, кремій та алюміній у складі панелей буде зменшуватись, а природоохоронний ресурсозберігаючий ефект – збільшуватись.

Більшість дослідницької літератури зосереджується на переробці фотоелектричних модулів першого та другого поколінь [7,8]. Водночас відмічається, що переважна більшість таких досліджень присвячена переробці кремнієвих (c-Si) фотоелектричних модулів першого покоління (переважно полікристалічних), які становлять 85...95% встановлених панелей з початку 1990-х рр., а в деяких країнах – початку 1980-х рр. Донедавна панелі CIGS та CdTe склали відповідно 2% та 5% частки ринку продажів сонячних панелей у всьому світі [2,7].

Важливим для прогнозування сценарію утворення відходів СФП є визначення терміну використання панелей. Літературні дані свідчать про різний підхід щодо терміну експлуатації панелей. Середнім діапазоном між 30-річним та 20-річним терміном, які зустрічаються у джерелах інформації, є 25 років [7,9,10]. З урахуванням цих даних та відповідно до світової тенденції, відходи

панелей починають помітно збільшуватися у період 2030...2035 рр., досягаючи піку між 2040 і 2050 рр.

Згідно джерел інформації, кількість відходів сонячних панелей у 2016 році склала 1,7 млн т, у 2030 році ця цифра сягне 8 млн т, а у 2050 складатиме 60 – 78 млн т [7].

Тенденції в технологічних дослідженнях та розробках вторинної переробки фотоелектричних модулів

Технологічні дослідження і розробки щодо переробки фотоелектричних модулів у деяких країнах проводяться вже 20 і більше років. Мотивація досліджень та розробки конструкцій відповідає змінам, що відбуваються в технологіях виробництва СФП.

Автором [11] досліджені зміни мотивації переробки фотоелектричних модулів у період 1990-2010 рр. Спочатку переробка с-Si була спрямована на відновлення Si-елементів/пластин, згодом – на відновлення Ag через високу цінність, а також витяг Рb через екологічні причини. У другій половині 2000 рр. екологічні питання стосувались відновлення скла з метою підвищення ефективності використання мінеральних ресурсів. Період з 2010 р. характеризується аналізом як екологічної, так і економічної ефективності відновлення скла та інших цінних компонентів.

Щодо фотоелектричних модулів на основі сполук CdTe та CIGS, то період 1990 рр. визначався розробками екологічної направленості (відновлення небезпечних матеріалів – Cd, Se та відновлення рідкісних металів (Te та In), через потенційний брак ресурсів. Друга половина 2000 рр., як і у випадку модулів с-Si, визначалась екологічними питаннями відновлення скла з метою підвищення ефективності використання мінеральних ресурсів.

Рушійною силою інновацій з періоду 2010 рр. є відновлення як важких компонентів, таких як скло, так і легких напівпровідникових металів/шарів з меншими витратами та з більшою швидкістю. Необхідно вирішити проблему збільшення якості відновлених матеріалів для поліпшення їх вторинного використання.

Таким чином, майже кожен період розробки технологій переробки відходів визначався ресурсоощадливою складовою та вирішенням екологічних питань. По мірі збільшення обсягів випуску СФП та утворення відходів вимоги до створення технологій переробки та утилізації відходів зростають і повинні стати більш жорсткими з точки зору природозберігаючої ефективності.

На рис. 1 приведений принциповий процес переробки фотоелектричного модуля, який включає грубу та тонку переробку:

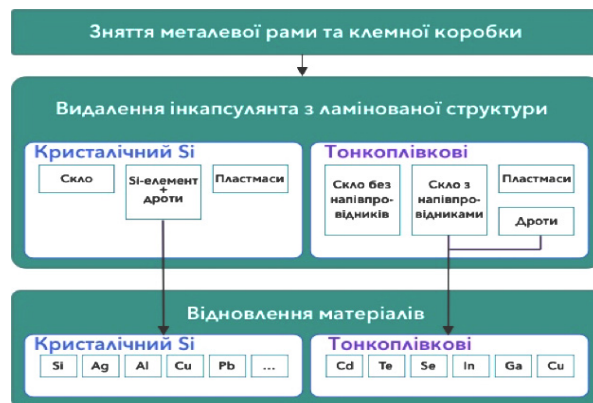


Рис. 1 – Принциповий процес переробки фотоелектричного модуля

Сучасні дослідження та розробки переробки та утилізації фотомодулів с-Si включають зняття металевої рами та клемної коробки. Проте видалення герметика з ламінованих структур залишається найбільш складним процесом. Застосовують термічний, механічний, хімічний та механічний у поєднанні з термічним і хімічним методи. Відновлення металів з Si-елементів проводиться травленням, застосуванням електролізу та іншими, в основному, шкідливими для довкілля способами.

У сучасних розробках щодо переробки фотоелектричних модулів на основі сполук для видалення інкапсулянта використовується термічний, механічний та механічний у поєднанні з термічним та хімічним методом, а також оптичний метод. Водночас найбільш перспективним є останній метод лазерного застосування.

Екологічні аспекти переробки та утилізації відходів фотоелектричних панелей.

Життєвий цикл сонячних фотоелектричних модулів супроводжується негативним впливом на елементи довкілля та людину. При виробництві СФП відбувається забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів [12]. Потрапляння забруднених відходів («e-waste») на сховища приводить до просочування токсичних речовин у ґрунт.

Типова СФП з кристалічного кремнію с-Si, яка займає 95% світового ринку, містить 76% скла, 10% полімера, 8% алюмінію, 5% кремнію, 1% міді та менше 0,1% срібла та інших елементів (олова, свинцю). Для тонкоплівкових технологій CdTe та CIGS потрібно менше матеріалу. Панель CdTe складається із 96...97% скла, 3...4 % полімеру та менше 1% напівпровідникових металів (нікель, олово, цинк). CIGS містить біля 88...89% скла, 7% алюмінію, 4% полімеру та менше 1% напівпровідникового матеріалу (індій, галій) [13].

У теперішній час технології переробки відходів дозволяють вилучити 80...90% напівпровідникових матеріалів та скла. При цьому до особливо цінних матеріалів панелей відносяться срібло, індій, телур,

силіцій. Також при переробці може бути вилучено свинець, олово, мідь, алюміній та ін.

Повний рециклінг та утилізація матеріалів СФП являє собою проблему, адже, наприклад, скло, з якого в основному складається панель, містить шкідливі домішки (кадмій, свинець, селен), тому переробка такого матеріалу простими способами викликає труднощі.

Зрозуміло, що мінімізація негативного впливу на довкілля відходів СФП може бути здійснена шляхом більш повної переробки відходів з максимальним вилученням корисних компонентів і зниження таким чином попиту на первинну сировину. Водночас актуальними є питання утилізації частин та елементів фотоелектричної панелі, які не можуть бути використані в основній технології переробки відходів.

Слід зазначити, що у теперішній час виробництво СФП, в якому витрачаються первинні природні матеріали, є природоємним. Переробка відходів не може задовільнити потреби виробництва фотоелектричних модулів і необхідно проводити подальші розробки корисних копалин у великих обсягах. Так, наприклад, для вилучення 50...90 г чистого кремнію необхідно переробити 1 т піску. У процесі розробок основних металів проходить забруднення водних ресурсів, ґрунтів важкими металами.

Обговорення результатів

Розвиток відновлювальної енергетики в останні роки характеризується нарощуванням потенціалу використання сонячних фотоелектричних систем. На виготовлення фотоелектричних модулів витрачається велика кількість матеріалів, які або виробляються із природної сировини або є супутніми продуктами переробки руд кольорових металів (кадмій, індій, галій, частково селен, телур). Нині фотоелектричні модулі споживають багато матеріалів, наприклад, до 40% телура, який пропонується ринком використовується у виробництві СФП [14].

Попит на кобальт, літій, нікель можуть перевищити запаси цих металів, а індію, срібла, телуру досягають 50% таких запасів. Геологічні поклади мінеральної сировини напівпровідникових металів визначаються як досить обмежені і це у майбутньому може стати проблемою виробництва СФП [15].

Сценарії накопичення відходів вказують, що утворення відходів СФП досягне максимального обсягу у порівнянні з теперішнім часом тільки через 25...30 років. Ймовірно, що у цей час можливо прогнозувати найбільш суттєве зменшення негативного впливу на довкілля від використання природної сировини шляхом повного циклу переробки відходів СФП.

Дотепер основні технології переробки відходів фотоелектричних панелей в середньому дозволяють досягти 80...90% рівня переробки. Зважаючи на це,

досить значну роль можуть мати способи утилізації частин (елементів) панелей, які не включаються у даний цикл переробки.

Висновки

1. Сонячна енергетика є вагомим напрямком розвитку відновлювальної енергії і джерелом утворення відходів СФП, обсяги яких будуть постійно зростати і у порівнянні з нинішнім часом досягнуть максимальних величин приблизно до 2050 р. У даний період за рахунок розробки досконалих технологій переробки та утилізації відходів СФП ймовірно суттєве зменшення використання природної сировини та, як наслідок, видобутку мінеральних ресурсів, порушення земель від гірничих робіт, а також забруднення елементів довкілля.

2. Переробка відходів СФП потребує розробки нових технологій та удосконалення існуючих, що передбачає максимальне вилучення корисних компонентів і, таким чином, зниження попиту на первинну сировину. При цьому при переробці відходів ставляться вимоги щодо підвищення якості одержаних матеріалів. Це у більшості випадків унеможливає в єдиному процесі переробити усі частини відходів фотоелектричних панелей, що складаються з однойменних компонентів. Зважаючи на дані умови, доцільним є проведення розробок технологій утилізації неперероблювальних матеріалів даних відходів, що можуть бути застосовані у неенергетичній сфері.

Список літератури

1. Global energy system based on 100 % renewable energy on power sector. URL: <http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/Full-Study-100-Renewable-Energy-Worldwide-Power-Sector-1.pdf> (дата звернення: 11.04.2021).
2. 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.
3. Укренерго. URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-ayihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi> (дата звернення: 11.04.2021).
4. Pundiev V., Rieztsov V., Surzhyk T., Shevchuk V., Sheiko S. Disposal of photovoltaic modules. Problems and international experience. *Vidnovlyvana Energetika*. 2019. № 4(59). P. 29-36. doi: 10.36296/1819-8058.2020.3(62).27-34
5. 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.
6. Chowdhury R., Apul D., Fry T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*. 2010. Vol. 54. Issue 4. P. 250-255. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.08.007.

7. Weckend Stephanie, Wade Andreas, Heath Garvin A. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. *United States*. 2016. doi: 10.2172/1561525.
8. 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. № 156. P. 37-48.
9. Kang D., White T. P., Thomson A. PV Module Recycling: Mining Australian Rooftops. 2015. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/PV-Module-Recycling%3A-Mining-Australian-Rooftops-Kang-White/d3237168273b50ce782fa85368d2cc18fd37eb5d> (дата звернення: 13.04.2021).
10. First Solar Recycling Recovers up to 90% of materials: First Solar. URL: <https://www.firstsolar.com/en/Modules/Recycling> (дата звернення: 11.04.2021).
11. Komoto Keiichi, Lee Jin-Seok, Zhang Jia, Ravikumar Dwarakanath, Sinha Parikhit, Wade Andreas, Heath Garvin A. End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. *United States*. 2018. doi: 10.2172/1561523.
12. Tawalbeh M., Al-Othman A., Kafiah F., Abdelsalam E., Almomani F., Alkasrawi M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 759. 143528. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143528.
13. 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.
14. Grandell L., Höök M., Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies. *Sustainability*. 2015. 7. 11818-11837. doi: 10.3390/su70911818.
15. Dominish E., Florin N., Teske S. Responsible minerals sourcing for renewable energy. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures. *University of Technology Sydney*. 2019. 52 pp.
4. Pundiev V., Rieztsov V., Surzhyk T., Shevchuk V., Sheiko S. Disposal of photovoltaic modules. Problems and international experience. *Vidnovluvana Energetika*, 2019, no 4(59), pp. 29-36, doi: 10.36296/1819-8058.2020.3(62).27-34.
5. 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, pp. 1092-1101, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.343.
6. Chowdhury R., Apul D., Fry T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, Vol. 54, Issue 4, pp. 250-255, doi: 10.1016/j.resconrec.2009.08.007.
7. Weckend Stephanie, Wade Andreas, Heath Garvin A. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. *United States*, doi: 10.2172 / 1561525.
8. 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, pp. 37-48.
9. Kang D., White T. P., Thomson, A. PV Module Recycling: Mining Australian Rooftops. 2015. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/PV-Module-Recycling%3A-Mining-Australian-Rooftops-Kang-White/d3237168273b50ce782fa85368d2cc18fd37eb5d> (accessed 13.04.2021).
10. First Solar Recycling Recovers up to 90% of materials: First Solar; Available at: <https://www.firstsolar.com/en/Modules/Recycling> (accessed 13.04.2021).
11. Komoto Keiichi, Lee Jin-Seok, Zhang Jia, Ravikumar Dwarakanath, Sinha Parikhit, Wade Andreas, Heath Garvin A. End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. *United States*, 2018, doi: 10.2172/1561523.
12. Tawalbeh M., Al-Othman A., Kafiah F., Abdelsalam E., Almomani F., Alkasrawi M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*, 2021, Vol. 759, 143528, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143528.
13. 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, pp. 437-457, doi: 10.1007/978-3-030-05843-2_11.
14. Grandell L., Höök M., Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies. *Sustainability*, 2015, 7, 11818-11837, doi: 10.3390/su70911818.
15. Dominish E., Florin N., Teske S. Responsible minerals sourcing for renewable energy. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures. *University of Technology Sydney*, 2019. 52 p.

References (transliterated)

1. Global energy system based on 100% renewable energy on power sector. URL: <http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/Full-Study-100-Renewable-Energy-Worldwide-Power-Sector-1.pdf> (access date: 11.04.2021).
2. 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.
3. Ukrrengo. Available at: <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi- vdvichi/> (accessed 11.04.2021).
13. 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, pp. 437-457, doi: 10.1007/978-3-030-05843-2_11.
14. Grandell L., Höök M., Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies. *Sustainability*, 2015, 7, 11818-11837, doi: 10.3390/su70911818.
15. Dominish E., Florin N., Teske S. Responsible minerals sourcing for renewable energy. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures. *University of Technology Sydney*, 2019. 52 p.

Відомості про авторів (About authors)

Самойленко Наталія Миколаївна – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри хімічної техніки та промислової екології; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0306-8425; e-mail: samoilenko@kpi.kharkov.ua

Nataliia Samoilenko – PhD, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor of the department of chemical engineering and industrial ecology, Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0306-8425; e-mail: samoilenko@kpi.kharkov.ua

Катенін Вадим Дмитрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6609-2652; e-mail: vadimkatenin1@gmail.com

Vadym Katenin – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", post-graduate student of the department of chemical engineering and industrial ecology, Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6609-2652; e-mail: vadimkatenin1@gmail.com

Баранова Антоніна Олегівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ст. викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Antonina Baranova – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer of department of chemical engineering and industrial ecology, Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Самойленко Н. М., Катенін В. Д., Баранова А. О. Переробка та утилізація фотоелектричних сонячних панелей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 121-126. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.17.

Please cite this article as:

Samoilenko N., Katenin V., Baranova A. Processing and recycling of photovoltaic solar panels. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 121-126, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.17.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Самойленко Н. Н., Катенін В. Д., Баранова А. О. Переработка и утилизация фотоэлектрических солнечных панелей. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 121-126. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.17.

АННОТАЦИЯ Проанализировано устойчивую тенденцию наращивания установленной мощности солнечных электростанций, сопровождаемую постепенным накоплением отходов солнечных панелей. Определены основные факторы негативного влияния на окружающую среду и здоровье человека производства солнечных фотоэлектрических панелей и их отходов. Проанализированы сценарии накопления отходов фотоэлектрических модулей, охарактеризованы особенности образования и накопления отходов в настоящее время и в перспективе. С учетом срока средней эксплуатации солнечных фотоэлектрических панелей в 25 лет, определено, что объемы отходов будут заметно увеличиваться в период 2030...2035, достигая пика между 2040 и 2050 годами. Охарактеризовано тип и состав фотоэлектрических панелей, которые определяют суть технологии переработки отходов. Определено, что сегодня большинство исследований по переработке отходов солнечных фотоэлектрических панелей сосредоточено на модулях первого поколения, что связано с масштабами эксплуатации данных панелей и рынками продаж. Выяснено, что в настоящее время производство солнечных фотоэлектрических панелей, в котором расходуются первичные природные материалы, является достаточно природоёмким, а непосредственно переработка отходов не может удовлетворить потребности производства фотоэлектрических модулей. Обосновывается объективная необходимость проведения в больших объемах добычи полезных ископаемых и использования запасов ценных металлов до наступления периода высокоэффективной переработки отходов солнечных фотоэлектрических панелей, отвечающих запросам производства. Рассмотрены современные тенденции в технологических исследованиях и разработках вторичной переработки фотоэлектрических модулей. Определено, что по мере увеличения объемов производства солнечных фотоэлектрических панелей и образования отходов, требования по обеспечению природосберегающей эффективности технологий переработки и утилизации отходов должны быть более жесткими. Это предполагает повышение степени переработки основных компонентов отходов, начиная с 80...90 % и до максимально высокого уровня. Определено, что одновременно с этой тенденцией, целесообразно проводить разработку технологий утилизации не перерабатываемых в настоящее время частей отходов.

Ключевые слова: отходы солнечных фотоэлектрических панелей; влияние на окружающую среду; накопление отходов; переработка; утилизация

Надійшла (received) 28.04.2021