

УДК 504.054

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-11>

**Наталія САМОЙЛЕНКО**

кандидат технічних наук, професор, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002

ORCID: 0000-0003-0306-8425

**Вадим КАТЕНІН**

аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002

ORCID: 0000-0002-6609-2652

**Антоніна САКУН**

PhD, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002

ORCID: 0000-0002-1079-7856

**Бібліографічний опис статті:** Самойленко, Н., Катенін, В., Сакун, А. (2023). Особливості операцій управління відходами фотоелектричних панелей в Україні у воєнний період. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 82–88, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-11>

## ОСОБЛИВОСТІ ОПЕРАЦІЙ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ФОТОЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ В УКРАЇНІ У ВОЄННИЙ ПЕРІОД

Актуальність використання сонячної енергетики в Україні та світовому масштабі визначається як невід’ємна частина переходу до відновлюваних джерел енергії. Стратегічний курс країни на розвиток відновлюваної енергетики сприяли значущому розвитку цього сектора до початку військових дій. Однак, війна спричинила великі втрати в секторі сонячної енергетики, зокрема зруйнування та виведення з ладу значної частини промислових та домашніх сонячних електростанцій. Ця кризова ситуація призвела до виникнення великої кількості відходів від сонячних фотоелектричних панелей (СФЕП), управління якими включає збирання, відновлення та рециклінг як ключові аспекти ефективного вирішення цієї проблеми в умовах триваючого військового конфлікту. Дослідження зосереджується на аналізі утворення та збирання відходів від СФЕП, виготовлених на основі кристалічного кремнію, який відіграє домінуючу роль у виробництві сонячних панелей. Проведено класифікацію відходів панелей, що утворюються у період військових дій. Визначено, що негативний вплив на довкілля ушкоджених та накопичених на ґрунті панелей може включати великі площі. Приведено загальні рекомендації щодо первинних операцій поводження з відходами панелей. Проблематика дослідження також включає питання відсутності в Україні виробничих потужностей по виготовленню СФЕП та інфраструктури переробки відходів СФЕП. Представлено декілька підходів до використання відходів скла з СФЕП у цементній промисловості, що можуть сприяти вирішенню проблеми управління відходами і зменшенню екологічного навантаження в регіоні. Важливість такого рециклінгу панелей визначається можливістю зменшення використання мінеральних ресурсів та зменшення викидів вуглекислого газу у виробництві цементу.

**Ключові слова:** сонячні фотоелектричні панелі, операції поводження з відходами, рециклінг, цементна промисловість.

**Nataliia SAMOILENKO**

*PhD, Professor, professor of the department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kirpychova Str., Kharkiv, Ukraine, 61002*

**ORCID:** 0000-0003-0306-8425

**Vadym KATENIN**

*post-graduate student of the department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kirpychova Str., Kharkiv, Ukraine, 61002*

**ORCID:** 0000-0002-6609-2652

**Antonina SAKUN**

*PhD., Associate Professor of the department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kirpychova Str., Kharkiv, Ukraine, 61002*

**ORCID:** 0000-0002-1079-7856

**To cite this article:** Samoilenko, N., Katenin, V., Sakun A. (2023). Osoblyvosti operatsii upravlinnia vidkhodamy fotolektrychnykh panelei v Ukraini u voiennyi period [Specifics of waste management operations for photovoltaic panels in Ukraine during the wartime]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 82–88, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-11>

## SPECIFICS OF WASTE MANAGEMENT OPERATIONS FOR PHOTOVOLTAIC PANELS IN UKRAINE DURING THE WARTIME

*The relevance of using solar energy in Ukraine and on a global scale is determined as an integral part of transitioning to renewable energy sources. The strategic course of the country towards the development of renewable energy contributed to the significant development of this sector until the onset of military actions. However, the war caused significant losses in the solar energy sector, including destruction and disabling a considerable portion of industrial and domestic solar power stations. This crisis situation led to the emergence of a large amount of waste from solar photovoltaic panels (PV), the management of which includes collection, restoration, and recycling as key aspects of effectively addressing this problem under the conditions of ongoing military conflict. The study focuses on the analysis of the formation and collection of waste from PVs, manufactured based on crystalline silicon, which plays a dominant role in the production of solar panels. A classification of panel waste generated during the period of military actions was conducted. It was determined that the negative impact on the environment of damaged and accumulated on the ground panels could cover large areas. General recommendations regarding primary operations for handling panel waste are provided. The research issue also includes the question of the absence in Ukraine of production capacities for the manufacturing of PVs and the infrastructure for processing PV waste. Several approaches to the use of glass waste from PVs in the cement industry are presented, which can contribute to solving the waste management problem and reducing the environmental burden in the region. The importance of such recycling of panels is determined by the possibility of reducing the use of mineral resources and reducing carbon dioxide emissions in cement production.*

**Key words:** Solar photovoltaic panels, waste management operations, recycling, cement industry.

**Актуальність проблеми.** На СЕС сьогодні припадає близько 4% виробленої електроенергії з відновлювальних джерел енергії у світі (Держенергоефективності, 2023), а встановлення фотоелектричних систем постійно збільшується (Masson, Bosch, Kaizuka, Jäger, 2022). Кліматичні умови України сприяють використанню сонячної енергетики, яка у останні десять – п'ятнадцять років довоєнного періоду активно розвивалась. Встановлена потужність СЕС складала 6227 МВт, кількість промислових сонячних електростанцій перевищувало 1290 («Зелений» тариф, 2020), а тільки на кінець 2021 р. в Україні налічувалось 44888 сонячних

установок приватних домогосподарств (Українська енергетика, 2022). На території України побудовані великі СЕС, потужність яких коливається від 43 до 246 МВт. Війна значно скоротила виробіток сонячної енергії, зруйнувавши промислові та приватні СЕС. За статистикою 2022 р. українська енергетика під час війни втратила значну частину потужностей: виведено з ладу чи окуповано 30% сонячної генерації (Енергетичний фронт, 2023). За оцінкою до кінця жовтня 2022 року з експлуатації довелось вивести близько 75% вітрових станцій та 45-50% – сонячних (Укрінформ, 2023). СЕС, що знаходяться на окупованій частині країни

не видають електроенергію в Об'єднану енергосистему України.

Руйнування та пошкодження об'єктів сонячної енергетики призводить до утворення величезної кількості відходів, точне визначення яких можливо за розрахунками, що проводяться на місці події. Прогнозні обсяги носять ймовірний характер і залежать від військових чинників. На жаль, війна ще продовжується, а тому кількість відходів СФЕП може збільшуватись. У зв'язку з цим гостро постає питання щодо управління відходами, зокрема операцій збирання, відновлення чи рециклінгу.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Стала тенденція розвитку сонячної енергетики закономірно приводить до продукування все більшої кількості відходів СФЕП, управління якими в кожній країні має свої особливості. В розвинених країнах розроблена та давно реалізується інфраструктура щодо логістики та рециклінгу відходів, яка регламентується на державному рівні з додержанням екологічних нормативів (Губанова, Купінець, 2022, Пундєв, Резцов, Суржик, 2022). Аналіз закордонних літературних джерел показує, що основну увагу науковці приділяють операціям утилізації відходів СФЕП, в більшій мірі розглядаючи їх з точки зору удосконалення. Проте проблема відходів СФЕП в Україні має більш широке вираження і стосується і інших операцій управління відходами (Катенін, Самойленко, 2022). У воєнний період особливе значення мають операції збирання і накопичення відходів СФЕП, що утворились в результаті військового руйнування енергетичної структури та будівель житлового і непромислового призначення. Також актуальним є питання рециклінгу відходів, що безпосередньо з цим пов'язується та має суттєве значення для відходів СФЕП, утворених іншим шляхом.

**Мета дослідження** полягає в аналізі сучасного стану утворення і накопичення відходів СФЕП в Україні та розробці науково-практичних рекомендацій щодо проведення основних операцій поводження з відходами.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

**Утворення та збирання відходів.** Фотоелектрична система на основі кристалічного кремнію (с-Si) є найстарішою і в даний час домінуючою технологією, яка складає приблизно 85 – 90% ринку фотоелектрики (Дер-

женергоефективності, 2023). Характеристика СФЕП з точки зору ресурсної оцінки та впливу на довкілля визначається складом матеріалів панелі. Основними елементами панелі є: алюмінієва рамка з анодованого або порошкового алюмінію; сонячні елементи, що виготовляються з кристалічного кремнію, який в залежності від розміру кристала пластини поділяється на полікристалічний та монокристалічний кремній. Тонкоплівкові сонячні елементи використовують аморфний кремній (1%). Такі за характером елементи можуть виготовлятися з теллуриду кадмію та мідного селеніду індію галію (CIGS), але їх використання, незважаючи на певні технічні переваги, досить обмежено. Цей напівпровідниковий матеріал наноситься на скло, полімер або метал. Матеріалами конструкції панелі є скло, пластикова плівка (EVA), а також мідь. Цей метал застосовується для електричної складової панелі, призначеної для електричного з'єднання елементів в модулі та передачі енергії (дроти, кабелі).

Типи відходів СФЕП за напрямками їх утворення у теперішній час представлені на рис. 1.

Кремнієві СФЕП вважаються найбільш екологічними у порівнянні з іншими. Водночас панелі, вражені військовою зброєю та не видалені з місця їх знаходження після цього, а також відходи, які неналежним чином зберігаються, чинять негативну дію на ґрунти. Авторами даної статті проведені дослідження, які показали, що мідні дроти пошкоджених панелей у цих умовах є джерелом небезпеки забруднення ґрунту важким металом, а саме міддю. Аналіз дернових ґрунтів показав перевищення ГДК міді у 2,74 рази при дослідженні дроту з механічним пошкодженням та у 1,34 рази – дроту з обпаленням ізоляції. Валова ж концентрація міді у ґрунті, що контактував з провідником, зростала до 40 разів. У місці розташування відходів СФЕП на ґрунті останній може змінювати свої властивості; також проходить міграція цього металу у поверхневі води. Опосередковано здійснюється негативний вплив на рослини та на здоров'я людей.

Потенційні обсяги відходів та опосередковано ризиків щодо можливої площі забруднення відходами орієнтовно можливо проаналізувати на основі обсягів встановлених сонячних панелей на промислових СЕС.

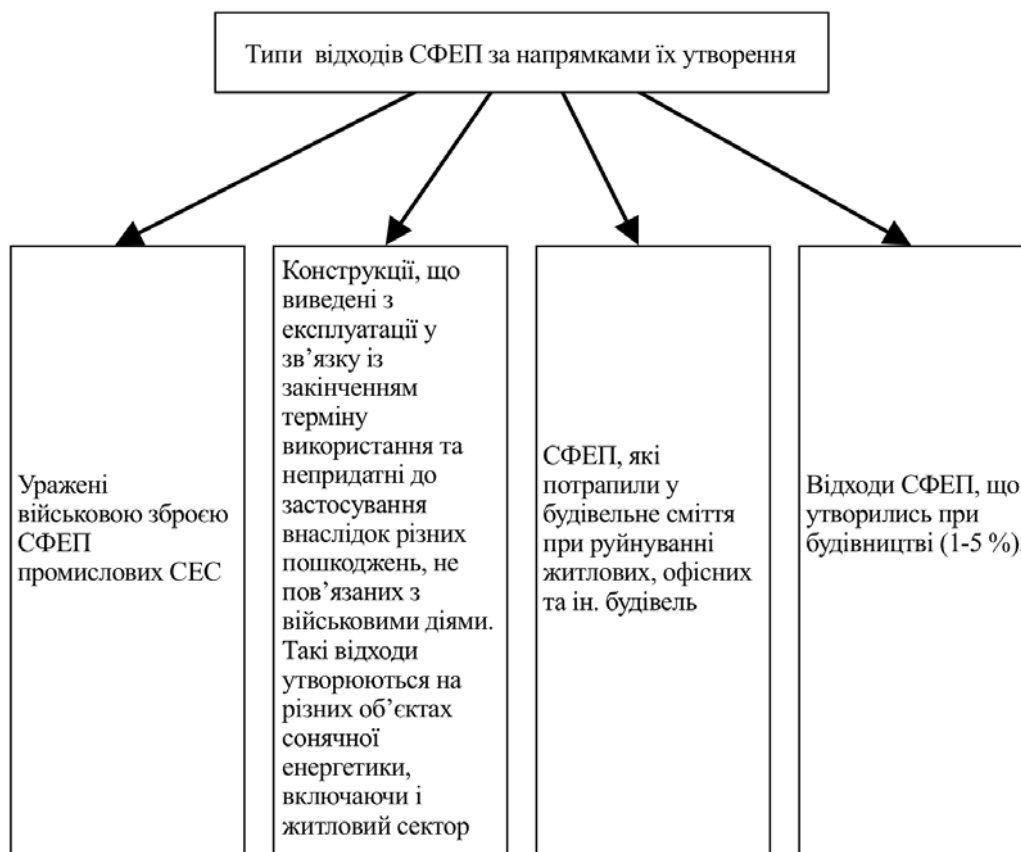


Рис. 1. Типи відходів СФЕП за напрямками їх утворення

На промислових станціях кількість СФЕП та площа, яку вони займають, залежить від багатьох природних та технічних чинників. Найбільші в Україні станції використовують сотні тисяч панелей і розташовуються на великих площах, так як 1 МВт потужності потребує близько 1,5 га землі (рисунок 2). (Укрінформ, 2023).

Площа, що займає одна панель, залежить від потужності і складає 2,44 – 5,33 м<sup>2</sup>. Можна передбачити, що пропорційно цьому буде здійснюватись негативний вплив на довкілля при знаходженні на ґрунті панелі, ураженої військовою зброєю.

Однією з основних складових сонячних панелей є скло, що має товщину біля 3 мм. Враховуючи це, можна обчислити, що вага скла в одній панелі досягає 18 та більше кг. При пошкодженні, наприклад, 100 панелей площа негативної дії на ґрунт може скласти 50 кв. м, а маса скла у відходах СФЕП досягти 1,83 т.

У поточний період немає точних даних щодо кількості зруйнованих сонячних генерацій; інформація з точки зору їх відновлення є вельми актуальною (АСЕУ закликає, 2023).

Дані опитування свідчать, що за типом пошкоджених електростанцій домашні СЕС становлять 64,7%, промислові наземні – 29,4%, промислові дахові – 5,9% (Екополітика, 2022). Відомо, що в Харківській області повністю зруйновані потужності і немає жодної діючої електростанції, частково відновлена робота СЕС «Solar Generation» в Миколаївській області. Під час обстрілів великих пошкоджень зазнала одна з найбільших в Україні СЕС «Токмак Solar Energy», яка знаходиться на тимчасово окупованій території у Запорізькій області. Її потужність складає 50 МВт, а площа, яку вона займає – 96,4 га. Наразі немає офіційної інформації щодо поведінки окупантів з відходами пошкодженого обладнання та інших елементів станції, що у тому числі включають сонячні фотоелектричні панелі (СФЕП). Точні дані можуть бути отримані лише після повної деокупації території.

Загалом по Україні після різкого падіння встановленої потужності, сонячна генерація дещо поступово відновлюється (рис. 3).





що характеризуються ресурсною цінністю (кремній) та екологічною небезпекою. В останній час більшість досліджень переробки сонячних панелей зосереджено на вилученні кремнію та переробці рідкісних металів (Ху, Лі, Тан, Peters, Yang, .2018). Водночас у багатьох країнах ці дослідження ще не мають широкого практичного застосування.

В Україні у поточний період немає виробництв, які б виготовляли сонячні фотоелектричні панелі. Також не створена індустрія переробки відходів СФЕП, яка б передбачала рециклінг складових панелей, у тому числі скла, що складає 67 % відходів панелей (традиційно таке скло застосовується для повторного виробництва панелей). Зважаючи на це, у найближчій перспективі доцільно використовувати скло як ресурсоцінний відхід для виготовлення іншої продукції. Існують обгрунтовані пропозиції використання склобою сонячних панелей у цементній промисловості (Шабанова, Корогодська, Шумейко, Катенін, Самойленко, 2023). Відходи скла можуть бути заміною портландцементу та натурального наповнювача у рецептурі бетону, застосовуватись для отримання надміцних бетонів та ін.

#### **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

В умовах війни формування основного обсягу відходів СФЕП промислових СЕС та сонячних установок приватних домогосподарств обумовлено ураженням фотоелектричних панелей військовою зброєю. Дані відходи здійснюють нега-

тивний вплив на ґрунти, забруднюючи їх іонами міді, що міститься у електричній частині панелі. Зважаючи на це, важливим є своєчасне видалення уражених СФЕП з місця події. Збирання та накопичення відходів покладається на їх власника, що у випадку промислових СЕС проводиться організовано. Водночас операції збирання відходів СФЕП, утворених при ураженні приватних будівель мають організаційні та технічні проблеми. Для їх вирішення доцільно залучення міських громад та уповноважених державних органів.

Скло, що складає найбільший відсоток у кремнієвих панелях, за світовою практикою звичайно переробляється на нові панелі. Так як в Україні не проводиться виготовлення СФЕП та не створена інфраструктура переробки відходів з цією метою, то доцільним є використання склобою панелей як цінної вторинної сировини у промисловому виробництві. Приблизні розрахунки показують, що обсяги скла, що може бути вилучено з панелі, можуть бути значними. Досліджено та пропонується використання склобою панелей у виробництві цементу. Такий підхід дозволить зменшити використання мінеральної сировини, енергетичних ресурсів та зменшить викиди діоксиду вуглецю у технологічних процесах виробництва цементної продукції.

Подальші дослідження можуть удосконалювати підходи до управління відходами СФЕП та рециклінгу матеріалів панелей, використовуючи їх як ресурсоцінну вторинну сировину для інших галузей української промисловості.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Masson G., Bosch E., Kaizuka I., Jäger-Waldau, Arnulf D. Snapshot of Global PV Markets PVPS, 2022. P. 7-22.
2. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Київ, 2023. URL: <https://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy> (дата звернення 24.10.2023).
3. Енергетичний фронт. Київ, 2023. URL: <http://surl.li/mmhfhf> (дата звернення 24.10.2023).
4. Губанова О.Р., Купінець Л.Є. Національна стратегія поводження з відходами сонячної енергогенерації. Київ: Центр екологічної освіти та інформації, 2022. С. 25-32.
5. Пундев В. О., Резцов В.Ф., Суржик Т.В Шевчук В. І., Шейко І. О Утилізація фотоелектричних модулів. Проблеми та міжнародний досвід. *Відновлювана енергетика*. 2020. № 3. С. 27-34
6. Катенін В. Д., Самойленко Н.М. Сучасний стан операцій поводження з відходами сонячних фотоелектричних панелей в Україні. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 5 (313). С. 89-93.
7. Укрінформ. Київ, 2023. URL: <http://surl.li/mmhng>. (дата звернення 24.10.2023).
8. Асоціація сонячної енергетики України, 2023. URL: <http://surl.li/mmhny>. (дата звернення 24.10.2023).
9. Екополітика. Київ, 2023. URL: <http://surl.li/mmhoh>. (дата звернення 24.10.2023).
10. Порядок поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків. Київ. 2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення 24.10.2023)

11. Xu Y., Li J., Tan Q., Peters A. L., Yang, C. Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste management*. 2018. №75. P. 450-458.
12. Шабанова Г.М., Корогодська А.М., Шумейко В.М., Катенін В.Д., Самойленко Н.М. Використання склобою сонячних панелей у цементній промисловості. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023*, 17–20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків : НТУ «ХПІ». С. 623.
13. Інформація щодо потужності та обсягів виробництва електроенергії об'єктами відновлюваної електроенергетики, яким встановлено «зелений» тариф. Київ. 2020. URL: [https://sae.gov.ua/sites/default/files/1\\_kv\\_2020\\_VDE.pdf](https://sae.gov.ua/sites/default/files/1_kv_2020_VDE.pdf). (дата звернення 24.10.2023).
14. Що залишилось від «зеленої» енергетики в Україні. Київ. 2023. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/05/24/700431> (дата звернення 24.10.2023).

#### REFERENCES:

1. Masson, G., Bosch, E., Kaizuka, I., & Jäger-Waldau, A. D. (2022). Snapshot of Global PV Markets. *PVPS*, 7-22.
2. Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy [State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine]. Retrieved from <https://sae.gov.ua/uk/ae/sunenergy> [in Ukrainian].
3. Energetychnyi front [Energy front]. Retrieved from <http://surl.li/mmhfh> [in Ukrainian].
4. Gubanova, O. R., & Kupinets, L. Ye. (2022). *Natsionalna strategiia povodzhennia z vidkhodamy soniachnoyi enerhoheneratsiyi* [National strategy for the management of waste from solar power generation]. Kyiv: Tsentr ekolohichnoi osvity ta informatsii, pp. 25–32. [in Ukrainian].
5. Pundiev, V. O., Reztsov, V. F., Surzhik, T. V., Shevchuk, V. I., & Sheiko, I. O. (2020). *Utilizatsiia fotoelektrychnykh modulei. Problemy ta mizhnarodnyi dosvid* [Utilization of photovoltaic modules. Problems and international experience]. *Vidnovlyuvana Energetyka*, (3), (pp. 27-34) [in Ukrainian].
6. Katenin, V. D., & Samoilenko, N. M. (2022). *Suchasnyi stan operatsii povodzhennia z vidkhodamy soniachnykh fotoelektrychnykh panelei v Ukraini* [The current state of operations dealing with the waste of solar photovoltaic panels in Ukraine]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, (5) [313], (pp. 89-93) [in Ukrainian].
7. Ukrinform (2023). Retrieved from <http://surl.li/mmhng> [in Ukrainian].
8. *Asotsiatsiia soniachnoi enerhetyky Ukrainy* [Solar Energy Association of Ukraine]. Retrieved from <http://surl.li/mmhny> [in Ukrainian].
9. *Ekopolityka* [Ecopolitics]. Retrieved from <http://surl.li/mmhoh> [in Ukrainian].
10. Verkhovna Rada Ukrainy. (2023). *Porjadok povodzhennia z vidkhodamy, shcho utvorylys' u zviiazku z poshkodzhenniam (rujnivanniam) budivel ta sporud vnaslidok boiovykh dii, terorystychnykh aktiv, dyversii abo provedennyam robiz z likvidatsii yikh naslidkiv* [Procedure for dealing with waste generated in connection with the damage (destruction) of buildings and structures due to hostilities, terrorist acts, sabotage, or the conduct of works to eliminate their consequences]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-%D0%BF> [in Ukrainian].
11. Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., & Yang, C. (2018). Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*, 75, 450-458.
12. Shabanova, H.M., Korogodska, A.M., Shumeiko, V.M., Katenin, V.D., & Samoilenko, N.M. (2023). *Vykorystannia skloboiu soniachnykh panelei u tsementnii promyslovosti* [The use of solar panel glass cullet in the cement industry]. In E.I. Sokol (Ed.), *Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorov'ia - Information Technologies: Science, Technique, Technology, Education, Health (MicroCAD-2023)*, (p. 623). Kharkiv: NTU "KhPI". [in Ukrainian].
13. *Informatsiia shchodo potuzhnosti ta obsiahiv vyrobnytstva elektroenerhii ob'iektamy vidnovliuvanoi elektroenerhetyky, yakym vstanovleno "zelenyi" taryf* [Information on the capacity and volumes of electricity production by renewable energy facilities with a "green" tariff]. Retrieved from [https://sae.gov.ua/sites/default/files/1\\_kv\\_2020\\_VDE.pdf](https://sae.gov.ua/sites/default/files/1_kv_2020_VDE.pdf) [in Ukrainian].
14. *Shcho zalyshylos' vid "zelenoi" enerhetyky v Ukraini* [What remains of "green" energy in Ukraine]. Retrieved from <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/05/24/700431> [in Ukrainian].