НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Катенін Вадим Дмитрович

УДК 504.062.2

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ОПЕРАЦІЙ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Спеціальність 101 – Екологія

Галузь знань 10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В.Д. Катенін

Наукові керівники:
Самойленко Наталія Миколаївна
кандидат технічних наук, професор

Корогодська Алла Миколаївна
доктор технічних наук, старший дослідник

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Катенін В.Д. Підвищення екологічної безпеки операцій поводження з відходами фотоелектричих панелей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 «Екологія» (10 – Природничі науки) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2024.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Об'єкт дослідження – управління відходами сонячних фотоелектричних панелей, що включає операції їх обробки і відновлення та враховує особливості утворення різних типів відходів у воєнний період.

Предметом досліджень – способи та методи підвищення екологічної безпеки операцій управління з відходами фотоелектричних панелей, що формуються під впливом відмінних чинників.

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача екологічно безпечного ведення операцій управління відходами фотоелектричних панелей, які мають особливі умови походження, включаючи масово утворені в Україні в умовах воєнних дій.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження та актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано зв'язок дисертаційного дослідження з науково-практичною роботою кафедри, визначено наукову новизну та сформульовано практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проаналізовано стан сонячної енергетики у світі та Україні, що безпосередньо пов'язується з утворенням відходів фотоелектричних панелей, обсяги яких збільшуються і вже зараз становлять актуальну проблему глобального

характеру. Розвиток сонячної енергетики в Україні характеризується особливостями, викликаними воєнними діями, що призводять до пошкодження та руйнації різних видів СЕС. За результатами аналізу теоретичного матеріалу наукових робіт обґрунтовано, що відходи фотоелектричних панелей містять речовини, які можуть негативно впливати на довкілля. В теперішній час, в основному, вони формуються з панелей першого покоління, що виготовляються на кремнієвій основі. Утворення таких відходів у загальному випадку обумовлюється втратою ефективності роботи панелей та виводом їх з експлуатації. В Україні даний процес доповнюється масовим формуванням відходів, які утворились від ураження воєнною зброєю панелей СЕС та у подальшому залучені у загальну систему управління відходами в країні. На сьогодні практично відсутні дослідження щодо впливу цих відходів на довкілля та системи управління ними, які враховують їх специфіку. Також не створено організаційні структури для здійснення операцій обробки та рециклінгу відходів сонячних фотоелектричних панелей, що мають різне походження. Таким чином, подальших досліджень потребують проблемні питання стосовно підвищення екологічної безпеки операцій управління з відходами як складовими загальної системи управління відходами в Україні та залучення ресурсоцінних складових відходів у циркулярну економіку країни. На основі отриманих результатів аналізу, були сформульовані задачі дослідження та шляхи їх вирішення.

У другому розділі проаналізовано та охарактеризовано методи, що дозволяють провести оцінку впливу відходів сонячних фотоелектричних панелей на довкілля та методи щодо їх переробки. Розглянуто методи визначення оцінки впливу електричної частини відходів на ґрунт та водне середовище з використанням мідних дротів, що мають різний ступінь пошкоджень. Методом атомної емісійної спектрометрії визначено концентрації іонів міді у пробах ґрунту та води, що містили зразки електричного провідника. Приведено методику відділення з сонячної панелі елементів, які підлягають дослідженню, та підготовки матеріалів щодо можливості використання склобою у виробництві будматеріалів. Із застосуванням хімічного та

рентгенофазового аналізу проаналізовано характеристику склобою та зразків цементів, а також проведені мікроскопічні дослідження матеріалів.

У третьому розділі розглядається запропонована класифікація відходів фотоелектричних панелей в Україні за типами утворення, що встановлює зв'язок з їх негативним впливом на довкілля. Проаналізовано, що найбільшу потенційну небезпеку складають відходи, утворені при ураженні панелей військовою зброєю. Орієнтовний ризик щодо площі забруднення від екологічно небезпечного управління відходами або у випадку надзвичайних ситуацій на СЕС, які у щонайбільшій мірі використовують сонячні фотоелектричні елементи, можливо проаналізувати на основі обсягів встановлених фотоелектричних панелей.

У даному розділі наведено результати експериментальних досліджень відносно впливу елементів електричної частини відходів фотоелектричних панелей на ґрунт та їх поведінку у прісноводних природних об’єктах. Визначено, що електричні провідники, які опинилися на ґрунті після пошкодження панелі, стають джерелом забруднення міддю. Дослідження, які проводились на дернових ґрунтах з використанням абсорбційно-спектрофотометричного методу, показали, що концентрація іонів міді склала 55 мг/кг та у порівнянні з еталоном збільшилась майже у 14 разів. Поведінка мідних дротів як елементів електричної частини фотоелектричних панелей на природні водойми визначалася для річкової води. Встановлено, що незважаючи на відому досить високу корозійну стійкість міді у цьому середовищі, має місце деяке самовільне руйнування металу.

У четвертому розділі представлено дослідження щодо комплексного запобігання негативній дії відходів фотоелектричних панелей на довкілля шляхом підвищення екологічної безпеки операцій управління відходами. Відзначено, що дії з управління з відходами фотоелектричних панелей регулюються загальними законодавчими актами, прийнятими в країні, які наразі розвиваються. Водночас передбачається віднесення даних відходів до електронних, регулювання поводження з якими може бути

доповнено Законом «Про електричне та електронне обладнання та відходи електричного та електронного обладнання», проєкт якого вже обговорюється.

Розроблена концепція екологічної безпеки операцій поводження з відходами фотоелектричних панелей, складові якої включають: блок пропозицій з екологічно безпечного збору та зберігання відходів та блок обґрунтування і вибору напрямку щодо переробки чи відновлення даних відходів. У першому блоці розглядається діяльність відносно особливостей управління з кожним типом відходів фотоелектричних панелей. Другий блок включає: визначення ризиків екологічної небезпеки відходів фотоелектричних панелей для розробки рекомендацій щодо подальшого поводження з ними та моделювання динаміки утворення відходів фотоелектричних панелей в Україні з метою планування діяльності зі сталого управління відходами.

Встановлено, що для визначення подальшого напрямку управління з відходами після операцій оброблення доцільно використовувати метод багатокритеріального аналізу рішень. У якості критеріїв ризиків екологічної небезпеки рециклінгу відходів фотоелектричних панелей рекомендується розглянути: оцінку стану відходів, екологічні і економічні ризики та визначений за цими критеріями загальний екологічний ризик (рейтинг) відходів.

Для прогнозування утворення відходів сонячних фотоелектричних панелей запропоновано математичну модель, що базується на динаміці їх формування та потужності сонячної енергетики в Україні. Модель надає можливість практичного планування обсягів виводу з експлуатації відпрацьованих панелей на промислових СЕС та інших енергетичних об’єктах, а також прогнозування їх утворення у системі управління відходами.

П’ятий розділ дисертації присвячений ефективному відновленню відходів фотоелектричних панелей, яка є обов’язковою умовою використання вторинних ресурсів у циркулярній економіці. За умови відсутності спеціалізованих структур для переробки відходів фотоелектричних панелей у теперішній час в Україні та технологій

їх переробки з поверненням у основне виробництво сонячних панелей, а також масового накопичення відходів, доцільним є їх рециклінг в інших напрямках виготовлення корисної продукції. Скло панелей є ресурсоцінним об'ємним компонентом відходів, який відповідно до світового досвіду у найбільшій мірі переробляється. З урахуванням цього пропонується використання даного компонента відходів у виробництві в'яжучих матеріалів та бетонів на їх основі. Теоретично обґрунтовано та експериментально встановлено можливість використання скла сонячних фотоелектричних панелей для часткової заміни цементу та для повної заміни природного заповнювача у складах обважених та важких бетонів, придатних для створення конструкцій загальнобудівельного та спеціального призначення.

За висновками щодо ефективності дисертаційного дослідження відзначені такі наукові результати:

1. Вперше охарактеризовано та класифіковано утворення відходів сонячних фотоелектричних панелей в Україні у воєнний період, а також визначені особливості відходів, уражених військовою зброєю;

2. Вперше визначено і доведено, що відходи c-Si панелей, які найбільш використовуються у світі та в Україні, при пошкодженні військовою зброєю забруднюють ґрунти іонами міді та можуть бути потенційним джерелом забруднення природних водойм;

3. Набула розвитку концепція підвищення ефективності діяльності із запобігання та зменшення шкідливого впливу на довкілля операцій поводження з відходами сонячних фотоелектричних панелей, що узгоджується з національною стратегією управління відходами в Україні;

4. Набуло розвитку прогнозування утворення відходів фотоелектричних панелей, що базується на динаміці їх формування та потужності сонячних електростанцій в Україні;

5. Удосконалено метод багатокритеріального аналізу для оцінки екологічного ризику, який визначає екологічно безпечні шляхи використання відходів сонячних фотоелектричних панелей;

6. Набуло розвитку теоретичне обґрунтування та експериментальне доведення можливості рециклінгу скла відходів сонячних фотоелектричних панелей для часткової заміни цементу та для повної заміни природного наповнювача у складах обважених та важких бетонів за рахунок їх матричної спорідненості.

Результати досліджень використані у межах науково-дослідної теми «Розробка наукових основ сталого управління та утилізації твердих відходів» (ДР 0124U001841), а також при проведенні наукового консультування на тему: «Розробка системи селективного збору, зеленої логістики та переробки відходів споживання» (договір № 154/34-2024 від 15 січня 2024 р.). Теоретичні результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі НТУ «ХПІ» при підготовці студентів за спеціальністю 101 «Екологія».

Ключові слова: відходи сонячних фотоелектричних панелей, фотоелектричний модуль, сонячна енергетика, відновлювана енергетика, моделювання, забруднення ґрунту, рециклінг, управління, бетон, природні водойми, екологічна безпека, сталий розвиток, цемент, мідь.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації у фахових виданнях України та науковометричних базах:

1. 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*, 2021, (2)(8), с. 121-126. (Б)

2. 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. (Б)

3. Самойленко Н. М., Корогодська А. М., Катенін В. Д. Дослідження впливу відходів сонячних фотоелектричних панелей на ґрунт. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*, 2023, (5)(50), с. 25-29. (Б)

4. Самойленко Н., Катенін В., Сакун А. Особливості операцій управління відходами фотолектричних панелей в Україні у воєнний період. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2023, (3), с. 82–88. (Б)

5. Корогодська А., Катенін В., Самойленко Н., Шабанова Г. Розробка складів бетонів з використанням відходів скла сонячних фотоелектричних панелей. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2023, (329)(6), с. 189-193. (Б)

6. Самойленко Н. М., Катенін В. Д. Моделювання динаміки утворення відходів сонячних панелей в Україні. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*, 2024, (1)(52), с. 95-100. (Б)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Katenin V. D., Samoilenko N. M. Opportunities for photovoltaic modules recycling process improvements. Тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції *«Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: MicroCAD-2021»* – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 261

8. Самойленко Н. М., Катенін В. Д. Поводження з фотоелектричними панелями об’єктів сонячної енергетики. Матеріали VI Міжнародного молодіжного конгресу *«Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»* – Київ: Національний університет «Львівська політехніка», 2021. – С.223.

9. Katenin V., Samoilenko N. Solar panels waste prospects in Ukraine. Theoretical and empirical scientific research: concept and trends: *Collection of scientific papers «ΛΌГОΣ» with Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*, Oxford-Vinnytsia: P.C. Publishing House & European Scientific Platform, 2021, T. 2, c. 18-19.

10. Katenin V.D., Samoilenko N.M. Environmental risks associated with PV panel components Тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції *«Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: MicroCAD-2023»*, с. 348.

11. Шабанова Г.М., Корогодська А.М., Шумейко В.М., Катенін В.Д., Самойленко Н.М. Використання склобою сонячних панелей у цементній промисловості. Тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції *«Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: MicroCAD-2023»*, Т. с. 623.

12. Катенін В.Д., Самойленко Н.М. Вплив відходів сонячних панелей на довкілля. Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: *Collection de matériaux de la VI conférence scientifique et pratique internationale*, Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC, 2024, с. 215-216.

13. Катенін В., Самойленко Н. Визначення екологічного ризику в управлінні відходами фотоелектричних панелей. *Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ»,* 29 березня 2024 р., Cambridge, UK, с. 279-283.

ABSTRACT

Katenin V.D. Enhancement of Environmental Safety in the Operations of Handling Photovoltaic Panel Waste. – Qualification research work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 101 "Ecology" (10 – Natural Sciences) – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2024.

The dissertation was written at the Department of Chemical Techniques and and Industrial Ecology of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2024.

The object of research is the management of waste from solar photovoltaic panels, which involves their processing and recovery operations and takes into account the specifics of the formation of different types of waste during the war period.

The subject of research is the methods and ways to increase the ecological safety of waste management operations from photovoltaic panels, which are formed under the influence of various factors.

This dissertation addresses the significant scientific and practical problem of environmentally safe handling operations for photovoltaic panel waste, which have special conditions of origin, including those massively generated in Ukraine during wartime.

The introduction substantiates the choice of the research topic and the relevance of the dissertation, formulates the purpose and objectives, defines the object, subject, and methods of research, shows the connection of the dissertation research with the scientific and practical work of the department, determines the scientific novelty, and formulates the practical significance of the obtained results.

The first chapter analyzes the state of solar energy in the world and Ukraine, which is directly related to the formation of photovoltaic panel waste, the volume of which is increasing and already represents a pressing global problem. The development of solar energy in Ukraine is characterized by features caused by military actions, leading to the damage and destruction of various types of solar power plants. Based on the analysis of

theoretical material from scientific works, it is substantiated that photovoltaic panel waste contains substances that can negatively impact the environment. Currently, they are mainly formed from first-generation silicon-based panels. The formation of such waste generally results from the loss of panel efficiency and their decommissioning. In Ukraine, this process is supplemented by the massive formation of waste from panels damaged by military weapons, which are subsequently integrated into the general waste management system in the country. To date, there are practically no studies on the impact of this waste on the environment and management systems that take into account their specifics. Additionally, organizational structures for processing and recycling photovoltaic panel waste of different origins have not been established. Thus, further research is needed to address issues related to enhancing the environmental safety of waste management operations as components of the overall waste management system in Ukraine and integrating valuable waste components into the country's circular economy. Based on the results of the analysis, research tasks and solutions were formulated.

In the second chapter, methods that allow for the assessment of the environmental impact of photovoltaic panel waste and methods for their recycling have been analyzed and characterized. The methods for determining the impact assessment of the electrical part of the waste on soil and water environments using copper wires with varying degrees of damage have been examined. Atomic emission spectrometry was used to determine the concentrations of copper ions in soil and water samples containing electrical conductor samples. The methodology for separating elements from the solar panel for research and preparing materials for the potential use of glass waste in building material production has been presented. Using chemical and X-ray phase analysis, the characteristics of glass waste and cement samples were analyzed, and microscopic studies of the materials were conducted.

The third chapter presents a proposed classification of photovoltaic panel waste in Ukraine by types of formation, establishing a connection with their negative impact on the environment. It is analyzed that the greatest potential hazard is posed by waste generated

from panels damaged by military weapons. The estimated risk of contamination area from environmentally hazardous waste management or in case of emergencies at solar power plants, which mostly use photovoltaic elements, can be analyzed based on the volume of installed photovoltaic panels. This chapter provides the results of experimental studies on the impact of electrical components of photovoltaic panel waste on soil and their behavior in freshwater natural bodies. It was found that electrical conductors on the ground after panel damage become a source of copper contamination. Studies conducted on sod-podzolic soils using absorption-spectrophotometric methods showed that the concentration of copper ions was 55 mg/kg, which is almost 14 times higher compared to the standard. The behavior of copper wires, as elements of the electrical part of photovoltaic panels, in natural reservoirs was determined for river water. Despite the well-known high corrosion resistance of copper in this environment, some spontaneous destruction of the metal was observed.

The fourth chapter presents research on the comprehensive prevention of the negative impact of photovoltaic panel waste on the environment by increasing the environmental safety of waste management operations. It is noted that the actions related to managing photovoltaic panel waste are regulated by general legislative acts adopted in the country, which are currently being developed. At the same time, it is anticipated that these wastes will be classified as electronic, with their management potentially regulated by the "Law on Electrical and Electronic Equipment and Waste Electrical and Electronic Equipment," a draft of which is already under discussion.

A developed concept of environmental safety for handling photovoltaic panel waste operations includes: a block of proposals for environmentally safe collection and storage of waste, and a block for justifying and choosing directions for recycling or recovering this waste. The first block addresses activities related to managing each type of photovoltaic panel waste. The second block includes: assessing the risks of environmental hazards from photovoltaic panel waste for developing recommendations on their further management and modeling the dynamics of photovoltaic panel waste formation in Ukraine to plan sustainable waste management activities.

It is established that for determining the further direction of waste management after processing operations, it is advisable to use the multi-criteria decision analysis method. The criteria for assessing the environmental risks of recycling photovoltaic panel waste include: the condition of the waste, environmental and economic risks, and the overall environmental risk (rating) of the waste determined by these criteria.

To forecast the formation of solar photovoltaic panel waste, a mathematical model is proposed, based on the dynamics of their formation and the capacity of solar energy in Ukraine. The model allows for practical planning of the volumes of decommissioned panels at industrial solar power plants and other energy facilities, as well as forecasting their formation in the waste management system.

The fifth chapter is dedicated to the efficient recovery of photovoltaic panel waste, which is a prerequisite for the use of secondary resources in the circular economy. Given the absence of specialized structures for processing photovoltaic panel waste in Ukraine and technologies for recycling them back into the main production of solar panels, as well as the mass accumulation of waste, recycling them in other directions of useful product manufacturing is advisable. The glass of the panels is a valuable volumetric component of the waste, which, according to global experience, is mostly recycled. Taking this into account, it is proposed to use this component of the waste in the production of binding materials and concrete based on them. It is theoretically substantiated and experimentally established that the glass of solar photovoltaic panels can be used for partial replacement of cement and complete replacement of natural aggregate in the compositions of heavy and high-density concrete suitable for creating general construction and special-purpose structures.

The conclusions on the effectiveness of the dissertation research highlight the following scientific results:

1. For the first time, the formation of waste from solar photovoltaic panels in Ukraine during the wartime period has been characterized and classified, and the features of waste affected by military weapons have been identified;

2. For the first time, it has been determined and proven that the waste of c-Si panels, which are the most used in the world and in Ukraine, when damaged by military weapons, pollute the soil with copper ions and can be a potential source of pollution of natural water bodies;

3. The concept of increasing the efficiency of activities to prevent and reduce the harmful impact on the environment of operations related to the handling of PV panel waste has been developed, which is in line with the national waste management strategy in Ukraine;

4. The forecasting of the formation of photovoltaic panel waste, based on the dynamics of their formation and the capacity of solar power plants in Ukraine, has been developed;

5. The method of multicriteria analysis for assessing environmental risk, which determines environmentally safe ways of using PV panel waste, has been improved;

6. Theoretical justification and experimental proof of the possibility of recycling glass waste from PV panels for partial replacement of cement and for the complete replacement of natural aggregate in compositions of heavy and high-density concretes due to their matrix compatibility have been developed.

The research results were used within the scientific research project "Development of Scientific Foundations for Sustainable Management and Utilization of Solid Waste" (state registration number 0124U001841), as well as in scientific consulting on the topic: "Development of a System for Selective Collection, Green Logistics, and Recycling of Consumption Waste" (contract No. 154/34-2024 from January 15, 2024). The theoretical results of the dissertation are used in the educational process at NTU "KhPI" in the preparation of students majoring in 101 "Ecology".

Keywords: solar photovoltaic panels waste, PV module, solar energy, renewable energy, modeling, soil contamination, recycling, management, concrete, natural reservoirs, environmental safety, sustainable development, cement, copper.

LIST OF THE APPLICANT'S PUBLICATIONS

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Samoilenko N. M., Katenin V. D., Baranova A. O. Recycling and disposal of photovoltaic solar panels. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2021, (2)(8), pp. 121-126. https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.17.

2. Katenin V. D., Samoilenko N. M. Current state of operations for the handling of solar photovoltaic panel waste in Ukraine. *Bulletin of Khmelnytskyi National University*, 2022, (5)(313), pp. 89-93. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-89-93.

3. Samoilenko N. M., Korohodska A. M., Katenin V. D. Study of the impact of solar photovoltaic panel waste on soil. *Ecological Sciences: Scientific and Practical Journal*, 2023, (5)(50), pp. 25-29. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.4.

4. Samoilenko N., Katenin V., Sakun A. Features of waste management operations of photovoltaic panels in Ukraine during the war period. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2023, (3), pp. 82–88. https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-11.

5. Korohodska A., Katenin V., Samoilenko N., Shabanova G. Development of concrete compositions using glass waste from solar photovoltaic panels. *Bulletin of Khmelnytskyi National University*, 2023, (329)(6), pp. 189-193. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-189-192.

6. Samoilenko N. M., Katenin V. D. Modeling the dynamics of solar panel waste generation in Ukraine. *Ecological Sciences: Scientific and Practical Journal*, 2024, (1)(52), pp. 95-100. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.14.

Published works of approbation nature:

7. Katenin V. D., Samoilenko N. M. Opportunities for photovoltaic modules recycling process improvements. *Information Technologies: Science, Technology, Education, Health:*

Abstracts of the XXIX International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2021, Vol. III, p. 261.

8. Samoilenko N. M., Katenin V. D. *Handling of photovoltaic panels at solar energy facilities. 6th International Youth Congress "Sustainable Development: Environmental Protection. Energy Saving. Balanced Use of Natural Resources": Collection of Materials*, Lviv: Western Ukrainian Consulting Center (ZUKC), LLC, 2021, p. 223.

9. Katenin V., Samoilenko N. Solar panels waste prospects in Ukraine. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends: Collection of scientific papers «ΛΌГОΣ» with Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference,* Oxford-Vinnytsia: P.C. Publishing House & European Scientific Platform, 2021, Vol. 2, pp. 18-19. https://doi.org/10.36074/logos-10.12.2021.v2.05.

10. Katenin V.D., Samoilenko N.M. Environmental risks associated with PV panel components. *Information Technologies: Science, Technology, Education, Health: Abstracts of the XXXI International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2023*, p. 348.

11. Shabanova G.M., Korohodska A.M., Shumeiko V.M., Katenin V.D., Samoilenko N.M. Use of solar panel glass waste in the cement industry. *Information Technologies: Science, Technology, Education, Health: Abstracts of the XXXI International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2023*, Vol. IV, p. 623.

12. Katenin V.D., Samoilenko N.M. Impact of solar panel waste on the environment. Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: *Collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC*, 2024, pp. 215-216. https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.048.

13. Katenin V., Samoilenko N. Assessment of environmental risk in the management of photovoltaic panel waste. *Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ»*, 2024, Cambridge, UK, pp. 279-283. https://doi.org/10.36074/logos-29.03.2024.059.