

EDN: YRDNYA

УДК621.383.51.002.84 + 662.997

**С. Е. АНТОНЕНКО, В. О. ДОРОХИН**ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. о. Макеевский, г. Макеевка

## **МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

**Аннотация.** Эффективное использование солнечной энергии постепенно становится предметом исследований. По прогнозам к 2050 году на Земле скопится порядка 60...78 миллионов тонн старых солнечных панелей, если уже сейчас не начать их грамотную утилизацию. Ученые и инженеры решают эту проблему, разрабатывают соответствующие технологии, утверждают стандарты. В большинстве стран мира солнечные панели классифицируются как общие или промышленные отходы, кроме того в разных странах разрабатываются добровольные и нормативные подходы для специального управления «солнечным мусором». В настоящее время распространена грубая переработка с извлечением только стекла и алюминия. Тонкая переработка предполагает извлечение из фотоэлементов практически всех составных частей и их обработку. Для утилизации солнечных панелей на западных рынках появились коммерческие компании-переработчики. Переработка солнечных панелей позволяет уменьшить углеродный след, снизить стоимость производства за счет повторного использования материалов, миллионы тонн потенциальных отходов не попадают на свалки.

**Ключевые слова:** солнечные панели, переработка, утилизация.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

С 1980-х годов ископаемое топливо, индустриализация и быстрый рост населения привели к трем глобальным проблемам: нехватке энергии, экологическому ущербу и загрязнению окружающей среды. Перед лицом все более серьезных энергетических и экологических проблем солнечная, которая является универсальной, безопасной, богатой ресурсами и не загрязняющей окружающую среду, привлекает все большее внимание как экологически чистый источник энергии.

Эффективное использование солнечной энергии постепенно становится предметом исследований. Изобретение и производство солнечных элементов в некоторой степени смягчили текущую ситуацию нехватки энергии в мире. По мере того, как люди начинают уделять особое внимание вопросам энергетики, индустрия солнечной фотоэлектрики получила мощную поддержку со стороны стран по всему миру. Производство солнечных элементов по всему миру стремительно растет (рис. 1). Сегмент солнечных элементов в 2021 году продолжил ключевое расширение 2020 года, значительно увеличив производственные мощности. Общая мировая производственная мощность кристаллических кремниевых солнечных элементов достигла 423,5 ГВт – годовой прирост на 69,8 %. Общий объем производства составил 223,9 ГВт, увеличившись на 37 % в годовом исчислении по данным Китайской ассоциации фотоэлектрической промышленности.

Прогнозируется, что до 2030 года количество солнечных элементов продолжит расти со скоростью ~25 %. В 2017 году глобальная установленная мощность солнечных элементов превысила 90 ГВт, из которых Китай выделил 48 ГВт, США – 12,5 ГВт, Индия – 10 ГВт и Япония – 6,8 ГВт. Прогнозируется, что глобальная установленная мощность солнечной энергетики достигнет к 2050 году 4 500 ГВт (против 400 ГВт сегодня) [1]. Развитие солнечной энергетики, со временем, создает новую проблему – утилизацию отработавших срок солнечных панелей. По прогнозам к 2050 году на Земле скопится порядка 60...78 миллионов тонн старых солнечных панелей [2], если уже сейчас не



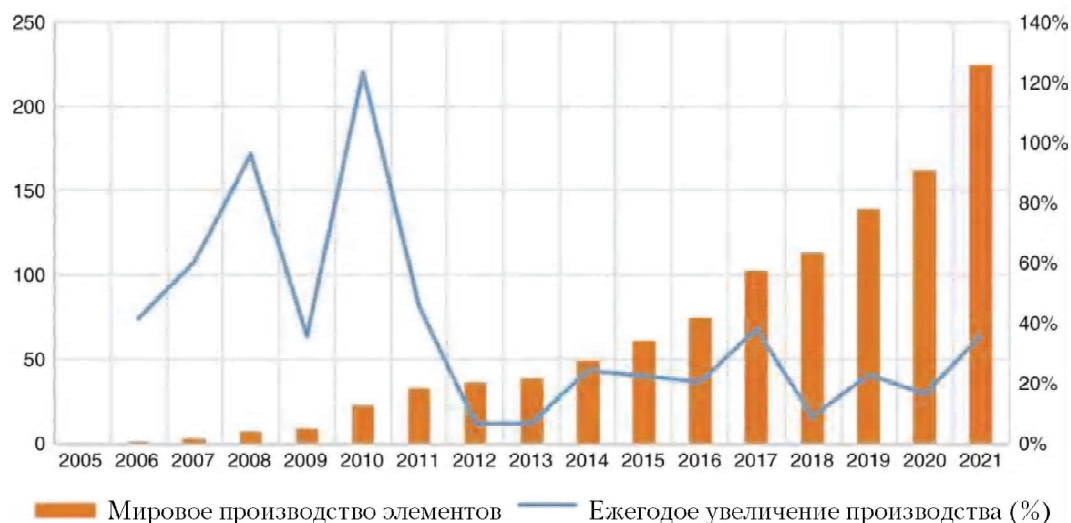


Рисунок 1 – Производство солнечных элементов по всему миру.

начать их грамотную утилизацию. Ученые и инженеры решают эту проблему, разрабатывают соответствующие технологии, утверждают стандарты.

### ЦЕЛИ

Необходимо изучить международный опыт утилизации солнечных элементов и возможность его применения в отечественной практике.

### ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Солнечная энергетика – молодая отрасль и пока не успела сильно намусорить. В то же время, она быстро развивается. Глобальная установленная мощность растет экспоненциально. Поэтому через 10–15 лет проблема утилизации солнечных панелей встанет в полный рост (рис. 2, рис. 3) [1, 2].

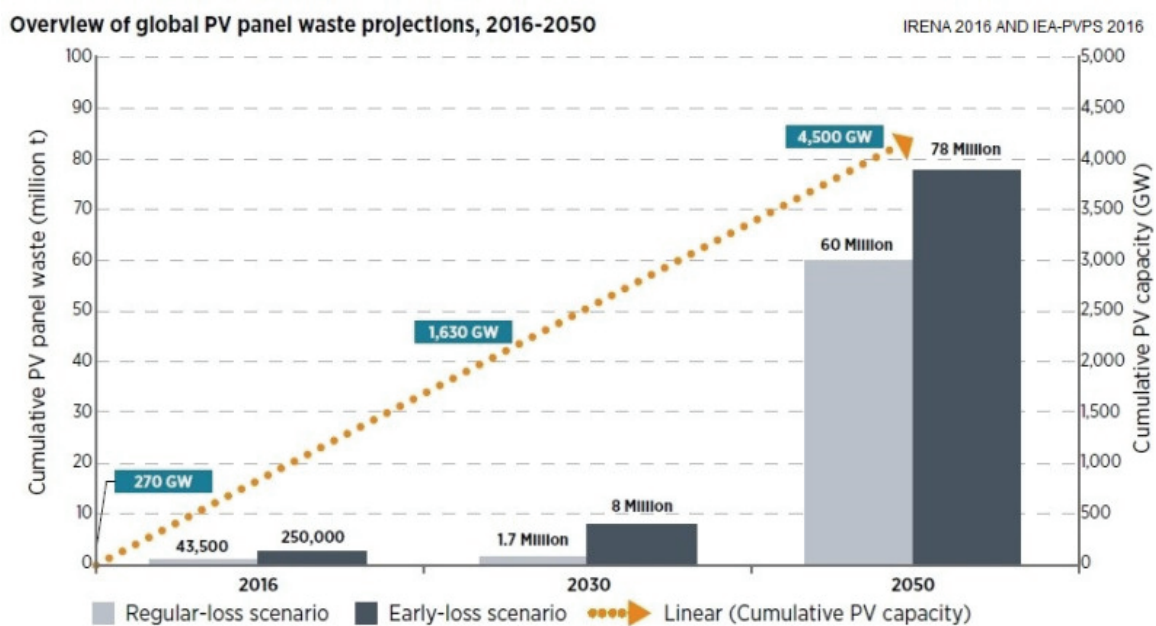
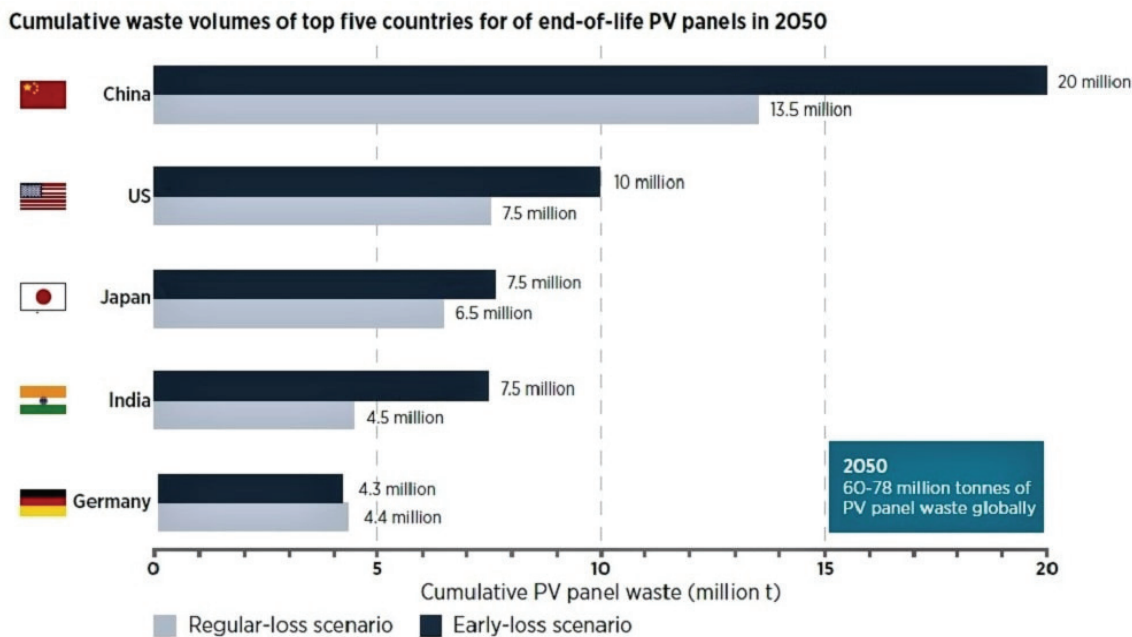


Рисунок 2 – Прогноз увеличения объема отходов фотоэлектрических панелей [2].



**Рисунок 3** – Накопительные отходы фотоэлектрических панелей (млн тонн) в разрезе стран-лидеров [2].

Использованные, отработавшие свое солнечные модули в Европе традиционно относят к категории электронного мусора (e-waste). В большинстве стран мира солнечные панели классифицируются как общие или промышленные отходы, управление ими осуществляется в соответствии с обычными требованиями, касающимися обработки и утилизации отходов. Помимо такого универсального регулирования в разных странах разрабатываются добровольные и нормативные подходы для специального управления «солнечным мусором».

К примеру, Европейский союз первым ввел правила утилизации отходов солнечных электростанций – модули должны утилизироваться в соответствии с Директивой об отходах электрического и электронного оборудования (WEEE) (2012/19/EU). С 2012 года положения Директивы WEEE были включены в национальное законодательство странами-членами ЕС, создав первый рынок, на котором переработка солнечных модулей обязательна.

В Соединенных Штатах утилизация панелей регулируется Законом о сохранении и восстановлении ресурсов (Resource Conservation and Recovery Act), который является правовой основой для управления опасными и неопасными отходами.

В Китае пока нет специальных правил по утилизации солнечных модулей, 70 % отработанных солнечных панелей в Китае просто выбрасывают из-за высокой стоимости переработки.

В Индии отходы фотоэлектрической энергетики управляются Министерством окружающей среды, лесов и изменения климата в соответствии с Правилами обращения с твердыми отходами 2016 года и Правилами опасными и другими отходам (управление и трансграничное перемещение).

В Японии отработанные солнечные панели подпадают под общие регламенты по управлению отходами (Waste Management and Public Cleansing Act). В 2017 году японская Ассоциация солнечной энергетики (Japan Photovoltaic Energy Association – JPEA) опубликовала руководство по надлежащему обращению с солнечными модулями по окончании срока их службы, но документ имеет рекомендательный характер. Дополнительно, Национальный институт передовых промышленных наук и технологий (NEDO) разрабатывает технологию переработки [3]. В 2016 году была опубликована совместная работа IRENA (Международного агентства возобновляемой энергетики) и МЭА (Международного энергетического агентства) «End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels» [2], в которой подробно описываются технологии и стратегии утилизации фотоэлектрических модулей.

Утилизация солнечных панелей зависит от рассмотренных сценариев (regularloss – использование модулей в течение 30-летнего срока службы, earlyloss – раннее окончание рока службы по разным причинам, например, замена морально устаревшего оборудования на более современное). Повод для беспокойства есть, поскольку эти приборы не так уж безопасны. Правильная утилизация

таких специфических отходов необходима, в противном случае тяжелые металлы, содержащиеся в фотоэлементах, без правильной утилизации будут выделяться в окружающую среду, что приведет к неблагоприятным последствиям для экологии.

Кроме того, грамотная утилизация солнечных батарей позволит сохранить и повторно использовать редкие природные элементы. Некоторые составляющие солнечных электростанций можно использовать повторно, однако создание специализированной инфраструктуры для переработки фотоэлементов только набирает обороты.

Некоторые зарубежные компании пытаются отремонтировать и повторно использовать панели, которые потеряли эффективность, или, по крайней мере, спасти некоторые из их компонентов. Повторное использование – это самый простой и дешевый способ «переработать» панели – он требует наименьшей обработки и наиболее экономически эффективен. Когда панель достигает гарантийного срока службы – это не значит, что она не может производить энергию. Несмотря на снижение эффективности, использованные панели могут быть установлены на волонтерских проектах, что и предлагает компания WFTSS в Мексике. WFTSS сотрудничает с волонтерской организацией, которая строит дома примерно в 20 странах для нуждающихся людей, включая Мексику. В Соединённых Штатах Америки есть компании, которые предлагают услуги по перепрофилированию и повторному использованию солнечных панелей. Сначала панели оценивают, потом ремонтируют. Поскольку эти модули отремонтированы, они продаются по более низкой цене по сравнению с новыми панелями (от 0,05 до 0,15 долларов США за ватт) [4]. Однако такой подход проблему утилизации не решает, а только ее отсрочивает.

Китай, США, Япония, страны ЕС активно инвестируют в исследования и разработки по переработке солнечных панелей. На сегодняшний день различают два вида переработки – тонкую и грубую [5].

– Грубая переработка. Предполагает извлечение лишь основных материалов – стекла, алюминия. Сегодня это предпочтительный способ переработки, однако, он не позволяет должным образом обработать ценные и опасные отходы солнечной энергетики.

– Тонкая переработка. Предполагает извлечение из фотоэлементов практически всех составных частей и их обработку. Сначала выполняется удаление рамы и распределительной коробки, далее удаляется ламинирующая плёнка, извлекается стекло, металлы, кремниевые элементы, пластик.

При тонкой переработке возможно извлечение всех химических элементов. В состав солнечных модулей входит сырьё, которое можно использовать вторично. Так, в процентном соотношении панель из кристаллического кремния – это 76 % стекла, 10 % полимерных материалов, 8 % алюминия, 5 % кремниевых полупроводников, 1 % меди, менее 0,1 % серебра, олова и свинца. В тонкопленочных модулях доля стекла гораздо выше – 89 % (CIGS) и 97 % (CdTe) [4].

Для того чтобы чистые затраты на вывод из эксплуатации были отрицательными (окупались), стоимость извлеченных материалов и/или стоимость освобожденной земли должны превышать затраты на вывод из эксплуатации. С одной стороны, полный демонтаж фотоэлектрической солнечной электростанции – достаточно простая операция, поскольку здесь нет капитальных строений с серьезными фундаментами. С другой стороны, на таких объектах используется большое количество стали, меди и алюминия, и ценность этих материалов вполне может превышать расходы на вывод эксплуатации.

Действительно, недавний экономический анализ показывает, что стоимость лома фотоэлектрической электростанции (в основном сталь и медь) превышает затраты на вывод из эксплуатации, что делает переработку предпочтительнее захоронения отходов.

В сценариях глубокой переработки чистый доход в результате работ по выводу объекта из эксплуатации может составлять US\$0,01–0,02/Ватт (без учета стоимости земли).

Таким образом, при надлежащей организации переработка отходов солнечных электростанций может быть выгодной даже без дополнительных мер стимулирования/регулирования.

На обычных фабриках по переработке электронных отходов с панелями не церемонятся: снимают металлическую раму и коммутационный модуль, чтобы отделить алюминий и медь, а затем пропускают всё остальное – стекло, полимеры, кремниевые ячейки – через огромный шредер. Получается масса битого стекла с небольшой долей примесей. По оценкам специалиста по солнечной энергетике из Университета Аризоны Менга Тао (Meng Tao), за стандартную панель из 60 ячеек, а точнее за содержащийся в ней алюминий, медь и стекло, переработчик может получить около \$3. При этом Сэм Вандерхуф из Recycle PV оценивает стоимость самой переработки до \$25 (если включать расходы на транспортировку). В то же время просто свалить панель на свалку, как твёрдые отходы, стоит меньше доллара [4].

Немцы преуспели в процессе переработки солнечных панелей, они наравне с североамериканцами были первооткрывателями в данной сфере. В Германии распространена та же технология переработки тонкопленочных солнечных панелей, что и в США, то есть переработка всех элементов панелей в едином цикле. Технология налажена – процесс переработки стал более экологичен и менее энергозатратный, нежели производство первичного сырья для фотоэлектрических панелей.

ЕС инвестирует значительные средства в проекты по утилизации солнечных панелей. Один из таких проектов – ELSi, которым занимается немецкая компания GeltzUmwelt-Technologie. Суть их технологии переработки заключается в повторном использовании материалов (а это около 95 %), извлеченных из солнечных панелей. Производительность предприятия – 50 тысяч солнечных панелей в год.

В 2018 году французская компания Veolia открыла промышленное предприятие, находящееся в Руссе, в регионе Буш-дю-Рон во Франции, по вторичной переработке солнечных панелей. Ранее во Франции, использованные или сломанные солнечные панели попросту перерабатывались установками для вторичной переработки стекла общего назначения. При таком процессе удавалось извлечь стекло и алюминиевые рамы, все остальное сжигалось. Сейчас же на новом заводе Veolia роботы разбирают панели для извлечения стекла, кремния, пластмассы, меди и серебра. Затем эти элементы измельчают в гранулы и подают как готовое сырье для производства новых солнечных панелей [6].

В настоящее время уровень переработки солнечных панелей в Великобритании относительно ограничен: несколько компаний предоставляют услуги и неадекватная инфраструктура для управления растущим объемом солнечных отходов. Среди известных фирм, предлагающих услуги по переработке в Великобритании **H & H Pro**, **ILM Highland** и **Recycle Solar Technologies**. По оценкам, в течение следующего десятилетия в Великобритании будет образовано 30 000 тонн отходов. Кроме того, ожидается всплеск спроса на панели, которые появятся на рынке в 2030-х годах, поскольку старые солнечные панели эпохи тысячелетия начнут приходить в негодность. Это создает спрос на сектор переработки панелей для расширения его возможностей по управлению растущим числом устаревших панелей и оказанию помощи в производстве солнечных панелей [7].

Как правило, утилизация осуществляется на заводах по переработке стекла и металла. В США и Европе владельцы солнечных панелей обязаны утилизировать вышедшие из строя фотоэлементы, что закреплено законодательно. Благодаря этому на западных рынках появились коммерческие компании-переработчики [5].

Переработка солнечных панелей – это беспроигрышный вариант: производители получают услугу по утилизации своих непригодных панелей и преимущество на рынке («мы перерабатываем»); установщики экономят время и деньги, которые им пришлось бы потратить на вывоз выведенных из эксплуатации панелей на свалку; опасные вещества содержатся и обрабатываются безопасно; углеродный след уменьшается, поскольку элементы и компоненты используются повторно, а не производятся с нуля; и, в совокупности, миллионы тонн потенциальных отходов удаляются со свалок.

## ВЫВОДЫ

Пока солнечная энергетика в России только набирает обороты, срок действия большинства эксплуатируемых панелей еще далеко не выработан, проблема утилизации и переработки солнечных батарей не ощущается остро. Однако в ближайшие 20–30 лет она даст о себе знать. В России стоимость переработки солнечных панелей пока превышает прибыль, которую можно получить, поэтому большинство использованных фотоэлементов попадают на свалку. Необходимо заниматься решением данной проблемы уже сейчас, особенно учитывая экологическую обстановку нашего региона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорович, В. Утилизация солнечных модулей (панелей). Проблемы, регулирование, практика / В. Сидорович. – Текст : электронный // renen.ru : [сайт]. – 14.03.2018. – URL: <https://renen.ru/pv-recycling-problems-regulation-practice/> (дата обращения: 19.09.2023).
2. End-of-Life Management Solar PV Panels. – Текст : электронный // IRENA and IEA PVPS. International Renewable Energy Agency : [сайт]. – 2016. – 100 p. – URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_IEAPVPS\\_End-of-Life\\_Solar\\_PV\\_Panels\\_2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf) (дата обращения: 19.09.2023).
3. Солнечный мусор: утилизация солнечных панелей. – Текст : электронный // Livejournal : [сайт]. – 26.02.2019. – URL: <https://coal-liza.livejournal.com/53251.html> (дата обращения: 19.09.2023).
4. Ваш солнечный дом: Утилизация солнечных панелей. – Текст : электронный // Ваш солнечный дом : [сайт]. – 24.12.2022. – URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/pv-recycling.htm> (дата обращения: 19.09.2023).

5. Как происходит утилизация солнечных батарей? – Текст : электронный // REENERGO : [сайт]. – 07.10.2022. – URL: <https://reenergo.ru/blog/kak-proishodit-utilizatsiya-solnechnyh-batarey/> (дата обращения: 19.09.2023).
6. Rollet, Catherine. Переработка фотоэлектрических панелей: почему мы не можем достичь 100 %? / Catherine Rollet. – Текст : электронный // pv-magazine : [сайт]. – august 26, 2020. – URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/08/26/recycling-pv-panels-why-cant-we-hit-100/> (дата обращения: 19.09.2023).
7. The Opportunities of Solar Panel Recycling. – Текст : электронный // Greenmatch : [сайт]. – 25.09.2023. – URL: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling> (дата обращения: 19.09.2023).

Получена 12.10.2023

Принята 27.10.2023

С. Е. АНТОНЕНКО, В. О. ДОРОХІН  
МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД ПЕРЕРОБКИ ТА УТИЛІЗАЦІЇ СОНЯЧНИХ  
ПАНЕЛЕЙ

ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури», Російська  
Федерація, Донецька Народна Республіка, м. о. Макіївський, м. Макіївка

**Анотація.** Ефективне використання сонячної енергії поступово стає предметом досліджень. За прогнозами до 2050 року на Землі накопичиться близько 60...78 мільйонів тонн старих сонячних панелей, якщо вже зараз не розпочати їхню грамотну утилізацію. Вчені та інженери вирішують цю проблему, розробляють відповідні технології, затверджують стандарти. У більшості країн світу сонячні панелі класифікуються як загальні або промислові відходи, крім того, у різних країнах розробляються добровільні та нормативні підходи для спеціального управління «сонячним сміттям». В даний час поширена груба переробка із вилученням тільки скла та алюмінію. Тонка переробка передбачає вилучення з фотоелементів практично всіх складових частин та їх обробку. Для утилізації сонячних панелей на західних ринках з'явилися комерційні компанії-переробники. Переробка сонячних панелей дозволяє зменшити вуглецевий слід, зменшити вартість виробництва за рахунок повторного використання матеріалів, мільйони тонн потенційних відходів не потрапляють на звалища.

**Ключові слова:** сонячні панелі, переробка, утилізація.

SVETLANA ANTONENKO, VLADISLAV DOROKHIN  
INTERNATIONAL EXPERIENCE IN THE DISPOSAL AND RECYCLING OF  
SOLAR PANELS

FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture», Russian  
Federation, Makeevka

**Abstract.** The efficient use of solar energy is gradually becoming a subject of research. According to forecasts, by 2050, about 60...78 million tons of old solar panels will accumulate on Earth, if their proper disposal does not begin now. Scientists and engineers solve this problem, develop appropriate technologies, and approve standards. Most countries around the world classify solar panels as general or industrial waste, and countries are developing voluntary and regulatory approaches to specifically manage solar waste. Currently, crude processing is common, extracting only glass and aluminum. Fine processing involves the extraction of almost all components from photocells and their processing. Commercial recycling companies have emerged in Western markets to recycle solar panels. Recycling solar panels reduces your carbon footprint, reduces production costs by reusing materials, and keeps millions of tons of potential waste out of landfills.

**Keywords:** solar panels, recycling, disposal.

**Антоненко Светлана Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: электрохимическое умягчение воды, новые материалы и оборудование при проектировании систем отопления, экологическая безопасность инженерных сетей, энергоэффективность зданий.

**Дорохин Владислав Олегович** – магистрант ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экологическая безопасность, экологическая безопасность инженерных сетей, энергоэффективность зданий.

**Антоненко Світлана Євгенівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва та господарства ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: електрохімічне зм'якшення води, нові матеріали і устаткування при проектуванні систем опалення, екологічна безпека інженерних мереж, енергоефективність будівель.

**Дорохін Владислав Олегович** – студент ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: екологічна безпека, екологічна безпека інженерних мереж, енергоефективність будівель.

**Antonenko Svetlana** – Ph. D. (Eng), Associate Professor, Municipal Building and Economy Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: electrochemical softening the waters, new materials and the equipment at designing of systems of heating, environmental safety of engineering networks, energy efficiency of buildings.

**Dorokhin Vladislav** – student, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: environmental safety, environmental safety of engineering networks, energy efficiency of buildings.