

**КОРОГОДСЬКА АЛЛА**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
<https://orcid.org/0000-0002-1534-2180>  
e-mail: [Alla.Korohodska@khpi.edu.ua](mailto:Alla.Korohodska@khpi.edu.ua)

**КАТЕНІН ВАДИМ**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
<https://orcid.org/0000-0002-6609-2652>  
e-mail: [Vadym.Katenin@mit.khpi.edu.ua](mailto:Vadym.Katenin@mit.khpi.edu.ua)

**САМОЙЛЕНКО НАТАЛІЯ**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
<https://orcid.org/0000-0003-0306-8425>  
e-mail: [Natalija.Samoilenko@khpi.edu.ua](mailto:Natalija.Samoilenko@khpi.edu.ua)

**ШАБАНОВА ГАЛІНА**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
<https://orcid.org/0000-0001-7204-940X>  
e-mail: [Halyna.Shabanova@khpi.edu.ua](mailto:Halyna.Shabanova@khpi.edu.ua)

## РОЗРОБКА СКЛАДІВ БЕТОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ СКЛА СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

У статті розглядається можливість використання скла сонячних фотоелектричних панелей для часткової заміни цементу та розроблення зразків бетонів на його основі. Обґрунтовано вибір портландцементу та глиноземного цементу для проведення досліджень за хімічним та мінералогічним складами. Отримано композиційний матеріал на основі портландцементу. Порівняно різні рецептури бетонів та визначено, що отримані зразки з використанням відходів не поступаються за границею міцності при стиску бетонам з використанням природних заповнювачів. В результаті проведених досліджень встановлено, що відходи скла сонячних фотоелектричних панелей можуть бути використані як заповнювач для отримання бетонів загальнобудівельного та спеціального призначення.

Ключові слова: сонячні фотоелектричні панелі, відходи скла, утилізація, цемент, бетон, міцність.

KOROGODSKA ALLA, KATENIN VADYM, SAMOILENKO NATALIJA, SHABANOVA HALYNA  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

## CONCRETE BLEND DEVELOPMENT USING GLASS SCRAP FROM SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS

The article analyzes the trend of waste generation from solar photovoltaic panels in a general aspect and its accumulation in Ukraine. It is noted that at present, the formation and increase of waste from these panels are influenced by military actions. Considering the absence of silicon-based solar photovoltaic panel manufacturing and glass recycling facilities for the production of new panels of this type in the country, its utilization in obtaining products using mineral raw materials is expedient.

The possibility of using glass from solar photovoltaic panels for partial replacement of cement and the development of concrete samples based on it is considered. The choice of Portland cement and alumina cement for research is substantiated based on their chemical and mineral compositions. A composite material based on Portland cement has been obtained.

The strength values obtained for the developed concretes correspond to the average values for ordinary normal concrete. The developed concretes are suitable for load-bearing elements of brickwork and have a strength class of M500 (grade B40). The concretes based on Portland cement composition and alumina cement have density classes of D2100 and D1800, respectively. The concrete obtained based on the Portland cement composition belongs to heavy concrete, while the one based on alumina cement belongs to lightweight concrete. According to the corresponding strength and class, the concretes should have water resistance classes of W10 and frost resistance classes of F200, which allows them to be used for the production of bridge structures, hydraulic structures, special reinforced concrete structures, bank vaults, subways, dams, and other structures with special requirements.

Keywords: solar photovoltaic panels, glass waste, utilization, cement, concrete, strength.

### Постановка проблеми

Фотоелектричні панелі є важливими джерелами відновлюваної енергії, оскільки вони безпечні для навколишнього середовища. Це одна з найбільш поширених технологій виробництва енергії, після гідро- та вітрової енергії [1]. Однак зі зростанням кількості установок, обсяги сонячних панелей, які повністю вичерпали свій ресурс, постійно збільшуватиметься [2]. Тільки в Європі у найближчі роки утвориться біля 43500 т відходів фотоелектричних панелей, а до 2050 року 60 млн т увійде до глобального потоку відходів [3]. У теперішній час в Україні неможливо спрогнозувати обсяги утворення відходів даних панелей, так як до конструкцій, що виходять з ладу за терміном експлуатації, додаються панелі, пошкоджені в результаті військових дій. Водночас за деякими підрахунками кількість відходів фотоелектричних панелей вже складає сотні тисяч, а у подальшому ця цифра ще суттєво збільшиться. Наразі в країні немає виробничих потужностей щодо виготовлення сонячних фотоелектричних панелей, а також відсутні і виробництва з утилізації їх відходів, серед яких основним компонентом є скло, що повертається у цикл виготовлення нової фотоелектричної продукції такого типу. У цих умовах вельми актуальним становиться питання утилізації скла панелей, обсяги якого досить значні і можуть мати промислове значення. З урахуванням зазначеного, доцільними є проведення досліджень щодо використання відходів скла як ресурсоцінної сировини у

виробництві бетонних виробів.

### Аналіз останніх джерел

Фотоелектричні технології характеризуються відносно довгим терміном служби, який оцінюється щонайменше в 20 років. Оскільки бум у цій галузі відбувся наприкінці 20 століття, наближається очікуваний кінець терміну служби перших фотоелектричних панелей, і необхідно знайти спосіб їх утилізації наприкінці їх життєвого циклу, адже поряд з нарощуванням використання фотоелектричних панелей буде пропорційно зростати і кількість їх як відходів. Наразі утилізованими є лише панелі, які отримали механічні пошкодження внаслідок неправильного поводження під час монтажу та транспортування [4, 5]. Залишається невирішеним питання щодо утилізації панелей, постраждалих внаслідок проведення бойових дій на території нашої держави.

Директива № 2012/19/EU Європейського Парламенту та Ради Європи щодо відходів електричного та електронного обладнання від 15 серпня 2018 року передбачає, що принаймні 85 % матеріалів для фотоелектричних панелей повинні бути відновлені, а 80 % матеріалів повинні бути підготовлені до повторного використання [6]. На теперішній час існує два основних типи фотоелектричних панелей: панелі на основі кремнію (монокристалічні та полікристалічні з аморфного кремнію) [7-10] і тонкошарові (тонкоплівкові) [8, 11]. Панель складається з верхнього шару – ударостійкого скла, шару етиленвінілацетату (EVA), сонячної батареї, розміщеної під шаром EVA, і тильної сторони з полівінілфториду (PVF) або комбінації полівінілфториду з поліетилентерефталатом (PTE). Підготовлену таким чином панель обрамляють алюмінієвими профілями [3]. Наприкінці життєвого циклу сонячних панелей після їх демонтажу утворюється декілька типів відходів: 67 % складає перероблене скло, 18 % – алюміній, 11 % – пластик, 3 % – кремній, 1 % – інші метали [12]. Через високий відсоток відходів скла як одного з компонентів демонтованих фотоелектричних панелей дослідження, в основному, зосереджені в цьому напрямку.

Використання відходів скла сонячних елементів фотоелектричних панелей як вторинної сировини розглядається через великі переваги, які включають зниження витрат на їх утилізацію, захист навколишнього середовища та збереження вихідної сировини.

Включення фотоелектричних відходів (зокрема, скла з фотоелектричних панелей) у цементну матрицю може стати одним із нових напрямків можливої їх переробки.

Сфера управління сонячними фотоелектричними панелями наприкінці їх експлуатаційного циклу вимагає подальших досліджень і розробок. Оскільки перероблене фотоелектричне скло є відходами, його можна використовувати як часткову заміну портландцементу в кількості 10–30 % від маси. У разі часткової заміни цементу скляними відходами у вигляді порошку зменшуються викиди CO<sub>2</sub>, що сприяє покращенню екологічних умов і зменшенню кількості скляних відходів, які в іншому випадку потрапляли б на звалища [13]. Інший варіант – заміна природного заповнювача фотоелектричним склом різних фракцій. У рецептурі бетону заповнювач становить близько 70 мас. %, що призводить до більшого використання відходів скла [14, 15]. Оскільки відходи скла вважаються пуцолановим матеріалом, їх можна використовувати як часткову заміну цементу у виробництві надвисокоміцних бетонів (УНРС) [16]. Часткова заміна заповнювача склопорошком і доменним зернистим шлаком значно підвищує механічну міцність бетону у пізні терміни тужавіння [17]. Тому метою даного дослідження було визначення можливості використання скла сонячних фотоелектричних панелей для часткової заміни цементу, а також як заповнювача для отримання бетонів.

### Вихідні матеріали та методика досліджень

Як вихідні матеріали для проведення досліджень використовували портландцемент ПЦ 1-500Р-Н (СЕМ 1 42,5 R) ПрАТ «Івано-ФранківськЦемент» та глиноземний вогнетривкий цемент Gorkal 40 фірми «GORKA CEMENT» (Польща).

Хімічний склад портландцементу, мас. %: SiO<sub>2</sub> – 21,7 - 22,30; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,6 - 5,20; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,8 - 4,20; CaO – 66,0 - 66,50 (у тому числі вільний – 0,3 - 0,5); MgO – 1,0 - 1,40; SO<sub>3</sub> – 0,2 - 0,40; R<sub>2</sub>O – 0,5 - 0,7; в.п.п. – 0,4 - 0,6. Хімічний склад глиноземного цементу, мас. %: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 36,0 – 55,0; CaO – 36,0 – 40,0; SiO<sub>2</sub> – 2,0 – 4,0; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 11,0 – 14,0 мас.%. с. %.

Мінералогічний склад портландцементу, мас. %: Ca<sub>3</sub>SiO<sub>6</sub> – 62,0 - 64,0; Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> – 11,0 – 13,0; Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> – 6,0 - 6,5; Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub> – 11,0 - 12,0. Мінералогічний склад глиноземного цементу, мас. %: CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> – 55,0 – 64,0; Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> – 2,8 – 3,2; Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub> – 10,0 – 14,0; Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub> – 20,0 – 26,0.

Відходи скла сонячних фотоелектричних панелей отримані у вигляді подрібненого матеріалу. Для визначення фракційного складу отриманого скла було проведено розсіювання з використанням набору стандартних сит [18]. Фракційний склад наведений у табл. 1.

Таблиця 1

### Фракційний склад склобою

Фракція, мм	Вміст фракції, мас. %, для складу заповнювача №		
	1	2	3
2,5	30	20	10
1,25	30	20	30
0,63	20	30	40
< 0,63	20	30	20

З представлених результатів встановлено, що таке співвідношення фракцій характерне для середнього заповнювача бетону. Для використання склобою як часткового заміника цементу він був домелений до тонкості, яка відповідає помелу цементу. Склобій був лише домелений, додаткова його обробка не проводилась.

Підготовка матеріалів та змішування в'язучого проводилось у порцеляновому кульовому млині впродовж 20 хвилин для гомогенізації, підготовка бетонних сумішей виконувалась вручну. Отриману суміш затворяли та укладали у металеві форми – куби: для дослідження цементів – розміром 50×50×50 мм; для дослідження бетонів – розміром 70×70×70 мм. Зразки зберігали у формах впродовж 1 доби у повітряно-вологих умовах. Через 1 добу форми розбирали і зразки зберігали впродовж 28 діб в аналогічних умовах. Через 2 та 28 діб визначили міцність отриманих зразків згідно ДСТУ Б В.2.7-187:2009.

#### Результати досліджень та їх обговорення

Часткова заміна цементу на склобій у складі в'язучого матеріалу є можливою, в основному, для портландцементу, оскільки наявність у складі скла понад 70 мас. %  $\text{SiO}_2$  дозволяє використовувати його як пуцоланову добавку, аналогічну синтетичному мікрокремнезему. Для визначення можливості часткової заміни цементу на подрібнений склобій готувались зразки з кількістю добавки 10 та 20 мас. %. Результати визначення міцності зразків наведені у табл. 2.

Таблиця 2

#### Міцність зразків портландцементу з використанням склобою

Добавка до цементу та її кількість, мас. %	Нормальна густина, %	Границя міцності при стиску, МПа, у віці, діб	
		2	28
Без добавки	28	35,1	92,3
Склобій, 10 мас. %	27	30,0	97,2
Склобій, 20 мас. %	27	28,0	89,1

Як видно з представлених результатів, введення склобою до складу в'язучої композиції знижує початкову міцність на 14 %, але у подальшому міцність цементної композиції не знижується при введенні до її складу склобою у кількості 10 мас. %. При збільшенні вмісту склобою нарощування міцності не відбувається внаслідок перебігу лужно-кремнеземної реакції (ASR). Луги, які утворюються при твердненні цементу, реагують з тонкомеленим склобоем, утворюючи розгалужені структури силікагелів. Останні здатні у великих кількостях поглинати рідину, створюючи внутрішні напруги у сформованому композиті та призводячи до його руйнації [19]. Таким чином, можливим є використання у складі портландцементних композицій до 10 мас. % склобою фотоелектричних панелей, що і було використано у подальших дослідженнях.

Для отримання бетонних зразків використовувались композиційна суміш портландцементу з 10 мас. % добавки склобою та глиноземний цемент. Як заповнювач використовувався склобій за фракціями, наведеними у табл. 1. Маркування зразків відповідало скороченій назві цементу та номеру складу заповнювача. Зразки бетонів виготовлялись методом віброущільнення на лабораторному віброустановці. Водотверде співвідношення складало 0,12. Тверднення зразків відбувалося у повітряно-вологих умовах. Після першої доби зразки витягувалися з металевих форм, на другу – піддавали випробуванням на міцність. Результати досліджень границі міцності на стиск для розроблених зразків бетонів на портландцементній композиції та глиноземному цементі наведені у табл. 3.

Таблиця 3

#### Фізико-механічні властивості бетонів на основі портландцементної композиції та глиноземного цементу

Маркування зразків	Границя міцності при стиску, МПа, у віці, діб	
	2	28
ПЦ-1	28,0	48,0
ПЦ-2	30,0	52,0
ПЦ-3	32,0	55,0
ГЦ-1	30,0	45,0
ГЦ-2	35,0	52,0
ГЦ-3	35,0	56,0

В результаті проведених досліджень встановлено, що відходи склобою фотоелектричних панелей можуть бути використані як заповнювач для отримання бетонів загальнобудівельного призначення. При цьому використання більш крупних фракцій скла є недоцільним, оскільки його гладка поверхня не дозволяє встановити міцне зчеплення з цементом та призводитиме до появи тріщин вздовж зерен заповнювача. Отримані значення міцності для розроблених бетонів відповідають середнім значенням для звичайного нормального бетону. Розроблені бетони придатні для несучих елементів цегляної кладки та мають марку за міцністю М500 (клас В40).

Для складів ПЦ-3 та ГЦ-3 було визначено щільність за методом гідростатичного зважування.

Встановлено, що отримані бетони мають щільність 2140 та 1850 кг/м<sup>3</sup>, а отже і марки за щільністю D2100 та D1800 відповідно. Тобто бетон на портландцементній композиції відноситься до важких, а на глиноземному цементі – до обважених. Таким чином, за відповідністю марки та класу отримані бетони повинні мати класи за водонепроникністю W10, а за морозостійкістю – F200, що дозволить використовувати їх для виготовлення мостових конструкцій, гідротехнічних споруд, спеціальних залізобетонних конструкцій, банківських сховищ, метро, дамб та інших конструкцій зі спеціальними вимогами.

### Висновки

За результатами проведених досліджень встановлено можливість використання скла сонячних фотоелектричних панелей як для часткової заміни цементу, так і для повної заміни природного заповнювача у складах обважених та важких бетонів, придатних для створення конструкцій загальнобудівельного та спеціального призначення.

### Література

1. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling / D. Sh. Chowdhury, K. S. Rahman, T. Chowdhury et al. // *Energy Strategy Reviews* – 2020. – Vol. 27. – Pp. 100431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
2. Extracts of Cement Composites Based on Recycled Glass / K. Máčalová, J. Charvát, V. Václavík, T. Dvorský // *GeoScience Engineering*. – 2022. – Vol. 68, Iss. 1. – Pp.16–21. DOI: <https://doi.org/10.35180/gse-2022-0065>
3. Recycling of Solar PV Panels – Product Stewardship and Regulatory Approaches / P. Majewski, W. Al-Shammari, M. Dudley et al. // *Energy Policy*. – 2021. – Vol. 149. – Pp. 112062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112062>
4. Padoan F. C. S. M. Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development / F. C. S. M. Padoan, P. Altimari, F. Pagnanelli // *Solar Energy*. – 2019. – Vol. 177. – Pp. 746–761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.003>
5. IRENA and IEA-PVPS (2016), “End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels,” International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems [Electronic resource]. – Available at: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
6. European Union. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Official Journal of the European Union 2012 [Electronic resource]. – Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>
7. Bagher A. M. Types of Solar Cells and Application / A. M. Bagher, M. M. A. Vahid, M. Mohsen // *American Journal of Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 3. – Pp. 94–113. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>
8. Lameirinhas R. A. M. A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications / R. A. M. Lameirinhas, J. P. N. Torres, J. P. Cunha de Melo // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – Pp. 1823. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15051823>
9. Bruton T. M. General Trends about Photovoltaics Based on Crystalline Silicon / T. M. Bruton // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2002. – Vol. 72. – Pp. 3–10.
10. Solar Panels – RD Solar [Electronic resource]. – Available at: <https://www.rdsolar.cz/hybridni-fotovoltaicke-elektrarny/solarni-panely>
11. Photovoltaics Report – Fraunhofer ISE [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html>
12. Recycling of Photovoltaic Panels – A Review of the Current Trends / K. Máčalová, V. Václavík, T. Dvorský et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* – 2020. – Vol. 867. – Pp. 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012029>
13. Afshinnia D. K. Waste Glass in Concrete has Advantages and Disadvantages / D. K. Afshinnia [Electronic resource]. – Available at: <https://www.concretedecor.net/departments/concrete-placing/waste-glass-in-concrete-has-advantages-and-disadvantages/>
14. Esmaili J. A Review: Properties of Eco-Friendly Ultra-High-Performance Concrete Incorporated with Waste Glass as a Partial Replacement for Cement / J. Esmaili, A. Oudah Al-Mwanes // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 42. – Pp. 1958–1965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.242>
15. Ducman V. Lightweight Aggregate Based on Waste Glass and Its Alkali–Silica Reactivity / V. Ducman, A. Mladenović, J. S. Šuput // *Cement and Concrete Research*. – 2002. – Vol. 32. – Pp. 223–226. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00663-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00663-9)
16. Adhikary S. K. Expanded Glass as Light-Weight Aggregate in Concrete – A Review / S. K. Adhikary, D. K. Ashish, Ž. Rudžionis // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 313. – Pp. 127848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127848>
17. Durability of Self-Compacting Concrete Containing Waste Bottle Glass and Granulated Slag / T. Ali-Boucetta, M. Behim, F. Cassagnabere et al. // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 270. – Pp. 121133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121133>

18. Шабанова Г. М. В'язучі матеріали. Практикум з дисципліни «ЗТТНСМ» / Г. М. Шабанова, А. М. Корогодська, О. В. Христич. – Харків: Підручник НТУ «ХПІ», 2014. – 220 с.
19. Tamanna N. Performance of Recycled Waste Glass Sand as Partial Replacement of Sand in Concrete / N. Tamanna, R. Tuladhar, N. Sivakugan // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 239. – Pp. 117804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>

#### References

1. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling / D. Sh. Chowdhury, K. S. Rahman, T. Chowdhury et al. // *Energy Strategy Reviews* – 2020. – Vol. 27. – Pp. 100431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
2. Extracts of Cement Composites Based on Recycled Glass / K. Mácalová, J. Charvát, V. Václavík, T. Dvorský // *GeoScience Engineering*. – 2022. – Vol. 68, Iss. 1. – Pp.16–21. DOI: <https://doi.org/10.35180/gse-2022-0065>
3. Recycling of Solar PV Panels – Product Stewardship and Regulatory Approaches / P. Majewski, W. Al-Shammari, M. Dudley et al. // *Energy Policy*. – 2021. – Vol. 149. – Pp. 112062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112062>
4. Padoan F. C. S. M. Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development / F. C. S. M. Padoan, P. Altimari, F. Pagnanelli // *Solar Energy*. – 2019. – Vol. 177. – Pp. 746–761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.003>
5. IRENA and IEA-PVPS (2016), “End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels,” International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems [Electronic resource]. – Available at: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
6. European Union. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Official Journal of the European Union 2012 [Electronic resource]. – Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>
7. Bagher A. M. Types of Solar Cells and Application / A. M. Bagher, M. M. A. Vahid, M. Mohsen // *American Journal of Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 3. – Pp. 94–113. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>
8. Lameirinhas R. A. M. A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications / R. A. M. Lameirinhas, J. P. N. Torres, J. P. Cunha de Melo // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – Pp. 1823. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15051823>
9. Bruton T. M. General Trends about Photovoltaics Based on Crystalline Silicon / T. M. Bruton // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2002. – Vol. 72. – Pp. 3–10.
10. Solar Panels – RD Solar [Electronic resource]. – Available at: <https://www.rdsolar.cz/hybridni-fotovoltaiicke-elektrarny/solarni-panely>
11. Photovoltaics Report – Fraunhofer ISE [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html>
12. Recycling of Photovoltaic Panels – A Review of the Current Trends / K. Mácalová, V. Václavík, T. Dvorský et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* – 2020. – Vol. 867. – Pp. 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012029>
13. Afshinnia D. K. Waste Glass in Concrete has Advantages and Disadvantages / D. K. Afshinnia [Electronic resource]. – Available at: <https://www.concretedecor.net/departments/concrete-placing/waste-glass-in-concrete-has-advantages-and-disadvantages/>
14. Esmaeili J. A Review: Properties of Eco-Friendly Ultra-High-Performance Concrete Incorporated with Waste Glass as a Partial Replacement for Cement / J. Esmaeili, A. Oudah Al-Mwanes // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 42. – Pp. 1958–1965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.242>
15. Ducman V. Lightweight Aggregate Based on Waste Glass and Its Alkali–Silica Reactivity / V. Ducman, A. Mladenović, J. S. Šuput // *Cement and Concrete Research*. – 2002. – Vol. 32. – Pp. 223–226. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00663-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00663-9)
16. Adhikary S. K. Expanded Glass as Light-Weight Aggregate in Concrete – A Review / S. K. Adhikary, D. K. Ashish, Ž. Rudžionis // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 313. – Pp. 127848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127848>
17. Durability of Self-Compacting Concrete Containing Waste Bottle Glass and Granulated Slag / T. Ali-Boucetta, M. Behim, F. Cassagnabere et al. // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 270. – Pp. 121133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121133>
18. Shabanova H. M. Viazhuchi materialy. Praktikum z dystsypliny «ZTTNSM» / H. M. Shabanova, A. M. Korohodska, O. V. Khrystych. – Kharkiv: Pidruchnyk NTU «KhPI», 2014. – 220 s.
19. Tamanna N. Performance of Recycled Waste Glass Sand as Partial Replacement of Sand in Concrete / N. Tamanna, R. Tuladhar, N. Sivakugan // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 239. – Pp. 117804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117804>