

УДК 691

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.78.1114

РОЗРОБКА РОЗЧИНІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$

ДЕРЕВ'ЯНКО В. М.¹, докт. техн. наук, проф.,

ГРИШКО Г. М.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,

ВАТАЖИШИН О. В.³, асп.,

ДРОЗД А. А.⁴, канд. техн. наук,

ДИМКІВСЬКА А. Д.⁵, студ.

¹ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: viktorderevianko2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

^{2*} Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: hryshko.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

³ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: vatazhichin.oleksandr@pdaba.edu.ua

⁴ ТОВ «Тадалс-буд», пров. Біологічний, 2, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 631-92-92, e-mail: Li2kondik@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-7588-5569

⁵ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: masolpochta@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-6611-8743

Анотація. Постановка проблеми. Світ розвивається, що несе за собою зміни. Змін зазнають і будівельні технології та матеріали. Для найскорішого відновлення інфраструктури та ліквідації наслідків війни потрібно застосовувати сучасні та ефективні методи будівництва. У будівництві нових споруд уже зараз можна впроваджувати технології, які працюють на скорочення часу будівництва, збільшення терміну служби будівельних структур, зменшення витрат на працю й ресурси та досягнення економічних переваг. Через те, що 3D-друк у будівництві – досі нова технологія та не має чітких нормативних вимог, розроблення складу сумішей стає важливим аспектом у світі будівельних матеріалів. **Мета дослідження** – розкрити інноваційну технологію

3D-друку в будівництві, показати її переваги та недоліки в експлуатації. Розробити розчини для 3D-друку на основі системи в'язучих речовин $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$. Показати вплив добавок на фізико-механічні властивості розчинів. **Висновки.** Проаналізовано технологію 3D-друку в будівництві, показано її переваги та недоліки. Виконано експериментальні лабораторні дослідження для розроблення в'язучих композитів для розчинів 3D-друку. Результати досліджень показують значне скорочення часу тужавлення композиту та збільшення його міцнісних здатностей на ранньому проектному віці завдяки використанню добавок. Прискорювач Мареї Мареquick AFK 777 пришвидшив кінець тужавлення з доби до 6 хвилин, тобто у 240 разів, а наявність нанодобавки, а саме тауриту, збільшила міцність в'язучого на стиск учетверо. Суперпластифікатор Sika ViscoCrete G2 підтримував необхідну текучість в'язучого, не збільшуючи водотвердне відношення у разі додавання інших добавок.

Ключові слова: 3D-будівництво; 3D-друк; роботизовані системи; інновації будівельної галузі; розчини; міцність; випробування; добавки; терміни тужавлення

DEVELOPMENT OF SOLUTIONS FOR 3D-PRINTING BASED ON THE SYSTEM OF BINDING SUBSTANCES $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$

DEREVIANKO V.M.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,

HRYSKO H.M.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assos. Prof.,

VATAZHYSHYN O.V.³, Postgrad. Stud.,

DROZD A.A.⁴, Cand. Sc. (Tech.),

DYMKIVSKA A.D.⁵, Stud.

¹ Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: viktorderevianko2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

^{2*} Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: hryshko.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

³ Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: vatazhichin.oleksandr@pdaba.edu.ua

⁴ Limited Liability Company “Tadals-bud”, 2, Biological Alley, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 631-92-92, e-mail: Li2kondik@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-7588-5569

⁵ Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: masolpochta@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-6611-8743

Abstract. Problem statement. The world is developing, which brings changes. Construction technologies and materials are also undergoing changes. Modern and efficient construction methods must be used to restore the infrastructure as soon as possible and eliminate the consequences of the war. In the construction of new structures, technologies can already be implemented that work to reduce construction time, increase the service life of building structures, reduce labor and resource costs, and achieve economic benefits. Due to the fact that 3D printing in construction is still a new technology and does not have clear regulatory requirements, the development of the composition of mixtures is an important aspect in the world of building materials. **Purpose of the study** is to reveal the innovative technology of 3D printing in construction, to provide its advantages and disadvantages in operation. Develop solutions for 3D printing based on the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ binder system. Show the effect of additives on the physical and mechanical properties of solutions. **Conclusion.** 3D printing technology in construction was analyzed, its advantages and disadvantages were provided. Experimental laboratory studies were carried out for the development of binder composites for 3D printing solutions. Research results show a significant reduction in the hardening time of the composite and an increase in its strength capabilities at an early design age due to the use of additives. Accelerator Mapei Mapequick AFK 777 accelerated the end of hardening from 1 day to 6 minutes, i.e. 240 times, and the presence of nanopowder, namely taurite, increased the compressive strength of the binder by 4 times. Sika ViscoCrete G2 superplasticizer maintained the necessary fluidity of the binder without increasing the water-hardening ratio when other additives were added.

Keywords: 3D construction; 3D printing; robotic systems; innovations in the construction industry; solutions; strength; trial; supplements; longing terms

Постановка проблеми. Сучасне будівництво завжди шукає нові технології для оптимізації процесу та зниження витрат. Одне з таких нововведень – створення будівельних елементів із використанням 3D-принтерів. Саме технологія 3D-друку стала вирішенням таких недоліків як довготривале будівництво, великі витрати на працю та ресурси та підвищена небезпека для навколишнього середовища.

Незважаючи на невелику кількість випущених у 2023 році нових продуктів, низьку економічну динаміку, що впливає на витрати, очікується, що ринок адитивного виробництва у 2024 році зросте приблизно на 20 % [8].

Ключовим аспектом успішної реалізації 3D-друку у будівництві бачиться розроблення спеціалізованих розчинів, які здатні забезпечити необхідні властивості матеріалів для 3D-друку в будівництві.

Тому дослідження, направлені на розроблення розчинів для 3D-друку на основі системи в'язучих речовин $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$, досить актуальні.

Аналіз публікацій. Вивченням та дослідженням адитивних технологій в будівництві займаються вчені всього світу такі як О. В. Андрійчук, Г. О. Андрощук, О. В. Струтинська, Л. Й. Дворкін, Р. Бусвел. Незважаючи на великий внесок цих авторів, технологічні та нормативні питання впровадження адитивних технологій у будівництво України все ще потребують подальшого наукового розроблення.

У праці [9] вказано, що потенційна цінність підходів швидкого виробництва зростає зі збільшенням складності проблеми. Якщо розглядати системи, зібрані з багатьох компонентів, ця складність максимізується, коли система виготовляється за допомогою єдиного процесу.

На рівні компонентів швидке прототипування може вплинути вже сьогодні. Зі збільшенням масштабу зростає і кількість традиційних матеріалів і методів, які потрібно замінити. Технічні проблеми зростають, але вирішення загальних проблем, таких як інтерфейси і з'єднання, стають концептуально більш здійсненними [9].

Одна з ключових інноваційних технологій – це 3D-друк бетону, який ще називають адитивним виробництвом. Цей процес включає в себе створення 3D-елементів будівель безпосередньо на будівельному майданчику за допомогою комп'ютеризованої цифрової моделі.

Адитивне виробництво значно сприяє поліпшенню екологічної безпеки завдяки зменшенню кількості відходів та споживання енергії. Більше того, 3D-друк стає економічно вигідним виробництвом, адже цей метод значно зменшує трудомісткість, кількість необхідних ресурсів та час виконання будівельних робіт [10].

Інноваційна технологія 3D-друку набирає популярності у будівництві завдяки своїй ефективності. Існує три основні методи 3D-друку:

- спікання (селективне спікання);
- напилення (компонентної склеювання, стереолітографія);
- пошарове екструдкування в'язкої робочої суміші [11].

Робочий принцип будівельного принтера базується на використанні екструдера, який наносить спеціальну швидкотужавну бетонну суміш із додаванням різних компонентів. Завдяки точному нанесенню шарів один на одного можна легко зводити не лише стіни, а й різноманітні конструкції. Ці шари міцно з'єднуються та ущільнюються, забезпечуючи не лише стійкість до власної ваги, а й опір вазі всієї будівлі. В разі потреби можна використовувати горизонтальне або вертикальне армування.

Залежно від характеристик конкретного принтера, висота та габарити будівлі змінюватимуться. За просторовим способом роботи будівельні 3D-принтери поділяються

на порталні принтери, дельта-принтери та роботизовані маніпулятори.

Завдяки 3D-друку можна економити на матеріалах, трудовитратах та енергії. Це робить виробництво більш ефективним та доступним, а також сприяє зниженню кінцевої ціни продукції.

Використання передових технологій, таких як 3D-друк, гарантує високу якість та точність у виготовленні будівельних компонентів. Це сприяє стабільності та надійності будівельних структур, підвищує рівень енергоефективності та раціонального використання ресурсів. Такі технології дозволяють створювати більш ефективні системи утеплення, вентиляції та освітлення, що сприяє збереженню енергії та зменшенню екологічного впливу будівлі на навколишнє середовище [3].

Разом із незаперечними перевагами 3D-друку існує і низка проблем у використанні цієї методики, а саме:

- відсутність нормативної законодавчої бази будівництва за допомогою 3D-друку;
- габаритні розміри будівель і споруд, що будуються, обмежені можливістю 3D-принтерів;
- висока трудомісткість устаткування [3].

Якісний 3D-друк будівель потребує використання матеріалів із чітко визначеними властивостями.

Для якісного формування бетону та його подальшої міцності необхідно підтримувати певну консистенцію, що залежить від вмісту води. Суміш бетону повинна мати достатню структурну міцність, щоб зберігати форму та нести навантаження від наступних шарів конструкції. Це досягається за рахунок чітко визначеного співвідношення води та цементу. Важливо, щоб бетонна суміш зберігала клейкість для міцного з'єднання з наступним шаром, запобігаючи утворенню окремих конгломератів, що гарантує монолітність та стійкість конструкції.

Для транспортування та формування бетону необхідна його рухомість. Це досягається за допомогою добавок, які не впливають на міцність, але поліпшують текучість.

Для досягнення необхідної якості найважливішими властивостями суміші вважаються:

- формовність (екструзійність),
- рухомість,
- структурна міцність (міцність екструдованого шару після укладки),
- термін придатності (строки тужавлення),
- міцність на стиск,
- міцність зчеплення між шарами.

Швидкотвердні бетонні суміші з модифікувальними добавками – це наразі найпопулярніший, найпоширеніший та найперспективніший матеріал для будівельного 3D-друку.

У статті [5] розроблено розчин на основі портландцементу I типу М500 та доменного гранульованого шлаку, міцність якого у віці 3 діб досягала максимум 17,8 МПа. Можна зробити висновок, що велика кількість використаної води значно зменшила міцність суміші.

Мета дослідження – розробити склад розчинів для 3D-друку на основі системи в'язучих речовин $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$ та визначити вплив добавок на їх фізико-механічні властивості.

Результати досліджень

Розроблення в'язучого для 3D-принтерів проводили, використовуючи:

напівводний гіпс Г-5 $\text{CaSO}_4 \times 0,5\text{H}_2\text{O} + 1,5\text{H}_2\text{O}$ та глиноземистий цемент ГЦ-40 $\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ у відсотковому співвідношенні 30:70 [1].

Спочатку дослідили вплив прискорювачів, а саме Coral Master Fix та Marei Marequick AFK 777, на терміни тужавлення в'язучого.

Підтримуючи необхідну рухомість суміші (150...170 мм по віскозиметру Суттарда), визначили необхідне водотвердне відношення та початок і кінець тужавлення. Результати наведені в таблиці 1.

Дослідження показує, що прискорювач тужавлення Marei Marequick AFK 777 має кращі показники, але за його використання значно збільшується необхідна кількість води. Тому вирішили проводити подальші випробування з використанням Marei Marequick AFK 777, додаючи суперпластифікатор, який зменшить водотвердне відношення.

Потім проаналізували вплив прискорювача Marei Marequick AFK 777 на терміни тужавлення в'язучого з використанням суперпластифікатора Sika ViscoCrete G2 та нанодобавки – тауриту при В/Т відношенні 0,42. Результати досліджень наведені в таблиці 2.

Таблиця 1

Вплив прискорювачів на терміни тужавлення

| Склад, % | | Прискорювач тужавлення, % | | В/Т | Терміни тужавлення | | Рухомість за Суттардом, мм |
|----------|------------------|---------------------------|-------------------------|------|--------------------|-------------------|----------------------------|
| ГЦ-40 | Напівводний гіпс | Coral Master Fix | Marei Marequick AFK 777 | | $t_{\text{поч.}}$ | $t_{\text{кін.}}$ | |
| 70 | 30 | – | – | 0,45 | 1 год. 6 хв. | 1 доба | 155 |
| 70 | 30 | 1 | – | 0,48 | 12 хв. | 28 хв. | 180 |
| 70 | 30 | – | 2 | 0,52 | 4 хв. | 6 хв. | 155 |

Таблиця 2

Вплив добавок на терміни тужавлення та текучість в'язучого

| № вар. | Склад, % | | Добавки, % | | | Терміни тужавлення | | Рухомість за Суттардом, мм |
|--------|----------|------------------|--|------------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------------|
| | ГЦ-40 | Напівводний гіпс | Прискорювач тужавлення – Marei Marequick AFK 777 | Пластифікатор – Sika ViscoCrete G2 | Нанодобавка – таурит | $t_{\text{поч.}}$ | $t_{\text{кін.}}$ | |
| 1 | 70 | 30 | – | – | – | 15 хв. 40 сек. | 21 хв. | 155 |
| 2 | 70 | 30 | 4 | 0,8 | – | 6 хв. 20 сек. | 7 хв. 30 сек. | 155 |
| 3 | 70 | 30 | 8 | 0,8 | 0,75 | 3 хв. 32 сек. | 9 хв. 29 сек. | 175 |

Таблиця 3

Вплив нанодобавки-тауриту на міцність в'язучого

| № вар. | Склад, % | | Добавки, % | | | R _{ст} , МПа |
|--------|----------|------------------|--|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| | ГЦ-40 | Напівводний гіпс | Прискорювач тужавлення - Marei Marequick AFK 777 | Пластифікатор - Sika ViscoCrete G2 | Нанодобавка - таурит | |
| 1 | 70 | 30 | – | – | – | 11,5 |
| 2 | 70 | 30 | 4 | 0,8 | – | 15 |
| 3 | 70 | 30 | 8 | 0,8 | 0,75 | 49,2 |



Рис. Вплив добавок на міцність в'язучого

Отже, вміст 8 % прискорювача, 0,8 % суперпластифікатора та 0,75 % нанодобавки – оптимальний склад, результати випробування якого відповідають нормативним вимогам. Далі були проведені дослідження міцності на стиск для розроблених складів. Результати досліджень наведені в таблиці 3 та на рисунку.

Дослідження показує, що в'язуче, в складі якого є добавки, має більшу міцність на стиск, ніж чистий склад. Наявність 0,75 % тауриту збільшує міцність учетверо. Зі складом в'язучого: 70 % ГЦ-40, 30 % Г-5, 8 % Marei Marequick AFK 777, 0,8 % Sika ViscoCrete G2 та 0,75 % тауриту розроблено розчин.

Висновки

Проаналізовано технологію адитивного виробництва у будівництві, вказано на його переваги та недоліки. Виконано експериментальні лабораторні дослідження

для розроблення в'язучих композитів для розчинів 3D-друку.

Дослідження вказують на відчутне зменшення часу, необхідного для твердіння композиту, та поліпшення його міцності на ранніх стадіях.

Прискорювач Marei Marequick AFK 777 скоротив час тужавлення з доби до 6 хвилин, зменшивши час настання кінця тужавлення у 240 разів. Суперпластифікатор Sika ViscoCrete G2 зберіг необхідну текучість суміші, при цьому не змінюючи водотвердого співвідношення за додавання інших добавок, тоді як наявність нанодобавки, зокрема тауриту, збільшила міцність в'язучого на стиск учетверо.

Композиційні в'язучі речовини, досліджені вище, можна використовувати для 3D-друку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дерев'яно В. М., Гришко Г. М., Ватажишин О. В. Модифіковані композиційні цементні системи CaO–Al₂O₃–SO₃–H₂O. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 3 (015). С. 59–65.
2. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Степасюк Ю. О., Марчук В. В. Ефективні будівельні розчини для 3D-принтера. *Будівельні матеріали та вироб.* № 1–2 (101). 2020. С. 16–21.
3. Згалат-Лозинська Л. О., Згалат-Лозинський О. Б. Розвиток та впровадження інноваційних технологій 3D-друку у будівництві. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія : Економіка і управління*. Т. 31 (70), № 5. 2020. С. 45–51 URL: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-5-7>
4. Комишев Д. Г., Белятинський А. О. Інноваційні технології в будівництві : 3D-друк будівель, мобільні програми та штучний інтелект. *Технічні науки*. 2023. Вип. 4 (104). С. 22–43.

5. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Зятюк Ю. Ю. Цементно-шлакові суміші для 3D-принтеру. *Будівельні матеріали та вироби*. № 1–2 (102). 2021. С. 14–19.
6. Андрійчук О. В., Оласюк П. Я. Застосування 3D-технологій у будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві*. 2015. Вип. 3. С. 11–18.
7. Петришина А. А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього. *Актуальні задачі сучасних технологій : матер. IV Міжнар. наук.-техн. конф. мол. уч. та студ. (25–26 листопада 2015 р.)*. Тернопіль, 2015. С. 26–27.
8. Попадюк С. Адитивне виробництво у 2024 році : тренди та прогнози. URL: <https://blog.iqb.ru/additive-manufacturing-trends-2024/> (дата звернення : 26.06.2024 р.)
9. Buswell R. A., Soar R. C., Pendlebury M., Gibb A. G., Edum-Fowte F. T., Thorpe T. Investigation of the potential for applying freeform processes to construction. *Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC)*. Rotterdam. The Netherlands. 2005. Pp. 141–150. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144> (дата звернення : 26.06.2024).
10. Hamidreza Gh. S., Corker J., Fan M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 93. Pp. 1–11 URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005> (дата звернення : 26.06.2024).
11. Перпері А. Використання 3D-друку в сучасному будівництві. URL: <http://surl.li/jtiluh> (дата звернення : 26.06.2024 р.)

REFERENCES

1. Derevyanko V.M., Hryshko H.M. and Vatazhishin O.V. *Modyfikovani kompozytsiyni tsementy systemy $CaO-Al_2O_3-SO_3-H_2O$* [Modified composite cements of the $CaO-Al_2O_3-SO_3-H_2O$ system]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 3 (015), pp. 59–65. (in Ukrainian).
2. Dvorkin L.Yu., Zhitkovskiy V.V., Stepasyuk Yu.O. and Marchuk V.V. *Efektivni budivel'ni rozchyny dlya 3D-printsya* [Effective construction solutions for a 3D printer]. *Budivel'ni materialy ta vyroby* [Building Materials and Products]. 2020, no. 1–2 (101), pp. 16–21. (in Ukrainian).
3. Zgalat-Lozynska L.O. and Zgalat-Lozynskiy O.B. *Rozvytok ta vprovadzhennya innovatsiynykh tekhnolohiy 3D-druku u budivnytstvi* [Development and implementation of innovative 3D printing technologies in construction]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya : Ekonomika i upravlinnya* [Scientific Notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series : Economics and Management]. 2020, vol. 31 (70), no. 5, pp. 45–51. URL: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-5-7> (in Ukrainian).
4. Komyshev D.G. and Belyatinsky A.O. *Innovatsiyni tekhnolohiyi v budivnytstvi : 3D-druk budivel', mobil'ni prohramy ta shtuchnyy intelekt* [Innovative technologies in construction: 3D printing of buildings, mobile applications and artificial intelligence]. *Tekhnichni nauky* [Technical Sciences]. 2023, iss. 4 (104), pp. 22–43. (in Ukrainian).
5. Dvorkin L.Yu., Marchuk V.V. and Zyatuk Yu.Yu. *Tsementno-shlakovi sumishi dlya 3D-printsya* [Cement-slag mixtures for a 3D printer]. *Budivel'ni materialy ta vyroby* [Building Materials and Products]. 2021, no. 1–2 (102), pp. 14–19. (in Ukrainian).
6. Andriychuk O.V. and Olasiuk P.Ya. *Zastosuvannya 3D-tekhnolohiy u budivnytstvi* [Application of 3D technologies in construction]. *Suchasni tekhnolohiyi ta metody rozrakhunku v budivnytstvi* [Modern Technologies and Calculation Methods in Construction]. 2015, vol. 3, pp. 11–18. (in Ukrainian).
7. Petryshyn A.A. *Tendentsiyi rozvytku tryvymirnoho druku, obladnannya ta materialiv dlya n'oho* [Trends in the development of three-dimensional printing, equipment and materials for it]. *Aktual'ni zadachi suchasnykh tekhnolohiy : materialy IV Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh ta studentiv (25–26 lystopada 2015 r.)* [Actual tasks of modern technologies: materials of the IV International scientific and technical conference of young scientists and students (November 25–26, 2015)]. Ternopil, 2015, pp. 26–27. (in Ukrainian).
8. Popadyuk S. *Adytyvne vyrobnytstvo u 2024 rotsi : trendy ta prohnozy* [Additive manufacturing in 2024 : trends and forecasts]. URL: <https://blog.iqb.ru/additive-manufacturing-trends-2024/> (access date : 06.26.2024). (in Ukrainian).
9. Buswell R.A., Soar R.C., Pendlebury M., Gibb A.G., Edum-Fowte F.T. and Thorpe T. Investigation of the potential for applying freeform processes to construction. *Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC)*. Rotterdam. The Netherlands, 2005, pp. 141–150. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144> (access date : 26.06.2024).
10. Hamidreza Gh.S., Corker J. and Fan M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*. 2018, vol. 93, pp. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005> (access date : 26.06.2024).
11. Perperi A. *Vykorystannya 3D-druku v suchasnomu budivnytstvi* [Use a 3D hand in a random future]. URL: <http://surl.li/jtiluh> (access date : 06.26.2024). (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 10.09.2024.