

УДК 66.001.5:693.546

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.80.836

ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАНТНИХ РІШЕНЬ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ

ШАТОВ С. В.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,

САВИЦЬКИЙ М. В.², докт. техн. наук, проф.,

ГОЛУБЧЕНКО О. І.³, канд. техн. наук, доц.,

МАЦЮК І. М.⁴, канд. техн. наук, доц.,

ШЛЯХОВ Е. М.⁵, доц.

^{1*} Кафедра будівельних і дорожніх машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-47, e-mail: shatov.sv@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-1697-2547

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

³ Кафедра будівельних і дорожніх машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-47, e-mail: ALEXGOL@UA.FM, ORCID ID: 0000-0003-2971-1263

⁴ Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 453-99-92, e-mail: matsiuk.i.m@nmu.one, ORCID: 0000-0002-0861-0933

⁵ Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 368-77-21, e-mail: shlyahove@nmu.org.ua, ORCID: 0000-0001-5983-9853

Анотація. Постановка проблеми. До інноваційних технологій у будівництві належить 3D-друку об'єктів різного призначення. В основі технології 3D-друку лежить принцип пошарового створення твердої моделі. Ця технологія базується на використанні будівельних 3D-принтерів, які за призначенням поділяються на принтери, що друкують будівлю повністю, і принтери, які створюють окремі конструктивні елементи для монтажу об'єктів. За конструкцією 3D-принтери бувають прогінного типу (головним чином у вигляді мостових конструкцій) та з консольним виконанням робочого обладнання у вигляді маніпуляторів. Принтери мостового типу дозволяють отримати більш якісні вироби за рахунок точного позиціонування робочого обладнання, у першу чергу екструдера, яким безпосередньо подається суміш. За короткий час розвитку 3D-друку в будівництві (15...16 років) створено значну кількість різноманітних 3D-принтерів мостового типу, однак відсутні відомості з їх дослідження та порівняльного аналізу характеристик, що дозволить удосконалити їх конструкцію для підвищення якості зведення об'єктів. **Мета** – порівняльний аналіз характеристик та показників роботи варіантних конструкцій 3D-принтерів мостового типу. **Результати дослідження.** На підставі аналізу варіантів виконання принтерів розроблено удосконалений 3D-принтер у вигляді мостової конструкції з екструдером із двома вихідними отворами. Це дозволяє значно підвищити продуктивність виготовлення виробів. **Висновок.** Розглянуто різні типи будівельних 3D-принтерів мостового типу, які мають недоліки та вимагають удосконалення. Розроблено удосконалену конструкцію 3D-принтера, яка забезпечує одночасний друк декількох виробів. Аналіз показників розглянутих варіантів 3D-принтерів показав, що використання удосконаленого принтера дозволить в 1,9...2,7 раза зменшити собівартість виготовлення 1 м³ виробів та в 1,8...2,6 раза зменшити металомісткість порівняно з іншими принтерами.

Ключові слова: 3D-друку будівельних об'єктів; варіанти виконання 3D-принтерів мостового типу; удосконалений 3D-принтер

RESEARCH OF OPTIONAL EQUIPMENT SOLUTIONS FOR 3D-PRINTING OF BUILDING PRODUCTS

SHATOV S.V.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

SAVYTSKYI M.V.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,

HOLUBCHENKO O.I.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

MATSIUK I.M.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

SHLIAHOV E. M.⁵, *Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Construction and Road Machinery, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-47, e-mail: shatov.sv@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-1697-2547

² Department of Reinforce-Concrete and Stone Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 745-23-72, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

³ Department of Construction and Road Machinery, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-73, e-mail: ALEXGOL@UA.FM, ORCID ID: 0000-0003-2971-1263

⁴ Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, 19, Ave. D. Yavornitskoho, 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 453-99-92, e-mail: matsiuk.i.m@nmu.one, ORCID: 0000-0002-0861-0933

⁵ Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, 19, Ave. D. Yavornitskoho, 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 368-77-21, e-mail: shlyahove@nmu.org.ua, ORCID: 0000-0001-5983-9853

Abstract. Raising of problem. Innovative technologies in construction include 3D printing of objects for various purposes. At the heart of 3D printing technology is the principle of layer-by-layer creation of a solid model. This technology is based on the use of construction 3D printers, which are divided into printers that print the entire building and printers that create separate structural elements for the installation of objects. By design, 3D printers are of the flight type (mainly in the form of bridge structures) and with cantilever work equipment in the form of manipulators. Innovative technologies in construction include 3D printing of objects for various purposes. At the heart of 3D printing technology is the principle of layer-by-layer creation of a solid model. This technology is based on the use of construction 3D printers, which are divided into printers that print the entire building and printers that create separate structural elements for the installation of objects. By design, 3D printers are of the flight type (mainly in the form of bridge structures) and with cantilever work equipment in the form of manipulators. Bridge-type printers allow you to get better products due to the precise positioning of the working equipment, especially the extruder, which directly feeds the mixture. In the short time of development of 3D printing in construction (15...16 years) created a large number of different 3D printers of the bridge type, but there is no information on their study and comparative analysis of characteristics, which will improve their design to improve the quality of construction. **Purpose.** Comparative analysis of the characteristics and performance of variant designs of bridge-type 3D printers. **The results of the study.** Based on the analysis of printer versions, an advanced 3D printer in the form of a bridge structure with an extruder with two outlets was developed. This can significantly increase the productivity of manufacturing products. **Conclusion.** Different types of construction bridge-type 3D printers are considered, which have shortcomings and require improvement. An advanced 3D printer design has been developed that allows multiple products to be printed simultaneously. The analysis of the indicators of the considered variants of 3D printers showed that the use of an improved printer will reduce 1,9... 2,7 times the cost of manufacturing 1 m³ of products and 1,8... 2,6 times reduce the metal content compared to other printers.

Keywords: 3D- printing of building objects; versions of 3D bridge-type printers; advanced 3D printer

Постановка проблеми. До інноваційних технологій у будівництві належить 3D-друку об'єктів різного призначення. В основі технології 3D-друку лежить принцип пошарового створення твердої моделі. Ця технологія базується на використанні будівельних 3D-принтерів, які за призначенням поділяються на принтери, що друкують будівлю повністю, і такі, які створюють окремі конструктивні елементи для монтажу об'єктів.

За конструкцією 3D-принтери бувають прогінного типу (головним чином у вигляді мостових конструкцій) та з консольним виконанням робочого обладнання у вигляді маніпуляторів. Принтери мостового типу дозволяють отримати більш якісні вироби

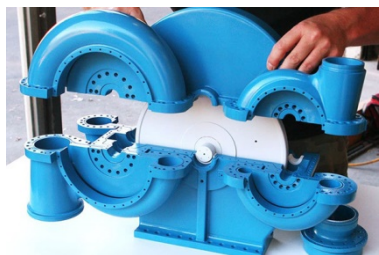
завдяки точному позиціюванню робочого обладнання, у першу чергу екструдера, яким безпосередньо подається суміш.

За короткий час розвитку 3D-друку в будівництві (15...16 років) створено значну кількість різноманітних 3D-принтерів мостового типу, однак відсутні відомості з їх дослідження та порівняльного аналізу характеристик, що дозволить удосконалити їх конструкцію для підвищення якості зведення об'єктів.

Аналіз публікацій. Створення об'єкта методом 3D-друку може здійснюватися різними способами і різноманітними матеріалами. Зараз 3D-принтер знаходить своє застосування у багатьох сферах виробництва (рис. 1): елементи та вузли

машинобудування, медицина, елементи інтер'єру, архітектура, різноманітні макети,

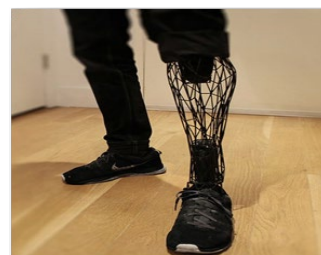
зокрема, макети космічних поселень тощо [2; 9; 13; 15].



а



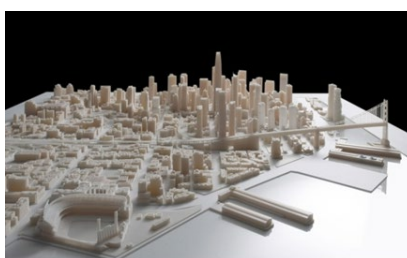
б



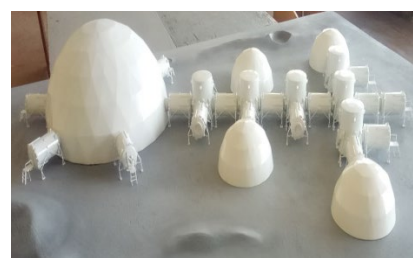
в



г



д



е

Рис. 1. Використання 3D-друку в промисловості:

а, б – машинобудування; в – медицина; г – дизайн; д – архітектура; е – макет поселення на Місяці

Будівельний 3D-принтер [1; 3–5; 8] використовує технологію екструзії, за якої кожен новий шар будівельного матеріалу видавлюється з принтера поверх попереднього (рис. 3).



Рис. 3. Процес укладання матеріалу 3D-принтером

Будівельні принтери ділять на дві групи: принтери, які друкують будівлю повністю (рис. 4 а, б), і такі, що друкують окремі конструктивні елементи (рис. 4 в, г), які використовують для зведення об'єктів. 3D-друк будівельних об'єктів у цілому доцільний, коли вони мають відносно невеликі габаритні розміри у площині

(6 × 8 м) та один-два поверхи. Це дозволяє в найкоротші терміни звести споруди за індивідуальним проектом із використанням різних матеріалів: бетонів (рис. 4 а–г), глини (рис. 4 е), комбінованих матеріалів (рис. 4 д).

Застосування 3D-принтерів для друку окремих елементів конструкцій в умовах виробництва дозволяє виключити сезонність будівництва, тобто друкувати частини будівель, витримувати їх у складських приміщеннях до набирання міцності бетоном і після цього збирати їх у будівлю на будівельному майданчику (рис. 4 г).

У процесі створення готових об'єктів задіяні мінімально двоє людей: оператор (безпосередньо керує принтером) і робітник (готує суміш, армує вироби в процесі друку, готує обладнання до використання на початку і кінці зміни). Кількість робітників залежить від розмірів обладнання і складності технологічного процесу, що залежить від конструктивних рішень виготовленого об'єкта [6; 12; 14].



а



б



в



г



д



е

Рис. 4. 3D-друк будівельних об'єктів та виробів:

а – будівельний 3D-принтер; б – зведена будівля; в – друк конструкцій; г – монтаж друкованих будівельних конструкцій; д – будівля з комбінованих матеріалів; е – споруда з глини

Принтери для 3D-друку мостового типу (рис. 5) мають різні габаритні розміри і масу, наприклад, 3D-принтер формату 12×12 м, призначений для друку малоповерхових будівель різних конфігурацій, великогабаритних виробів та конструкцій (рис. 5 а). Такі принтери мають чотири опорні стійки з двома поздовжніми балками, на яких установлена поперечна балка (мост) з візком та екструдером. У процесі зведення об'єкта переміщуються поздовжні та поперечна балки й візок з екструдером. Зараз такі конструкції принтерів дозволяють створювати малоповерхові будівлі різних архітектурних рішень. На перспективу існують розробки і з створення самопідйомних 3D-принтерів мостового типу для друку багатоповерхових споруд [2]. Проблема таких принтерів – це їх демонтаж після зведення об'єкта.

Для друку окремих конструкцій та виробів у закритих приміщеннях застосовують малоформатні принтери з ємністю екструдера 15...45 л, габаритами 8×2 м і масою 600...800 кг (рис. 5 б). У той же час, таке обладнання може мати значний

робочий майданчик у декілька десятків метрів (40...60) за рахунок установлення опорних колон та значної протяжності поздовжніх балок (рис. 5 в). Доцільність великого робочого майданчика зумовлена часом набирання міцності попередньо укладеного шару суміші та високою продуктивністю 3D-друку за такої організації робіт.

Завантаження підготовленої суміші в екструдер виконується двома способами: вручну робітником, який обслуговує принтер, та за допомогою бетононасоса, що нагнітає суміш від змішувача в екструдер по гнучкому трубопроводу (рис. 5 г).

Перед початком 3D-друку об'єктів та виробів раціонально змодельовати їх форму та відпрацювати цей технологічний процес [7]. Це виконується обладнанням мінімального формату з використанням реальних будівельних сумішей, що дозволяє перевірити прийняті проектні архітектурно-конструктивні рішення та отримати попередні відомості з економічних показників.



а



б



в



г

Рис. 5. Будівельні принтери мостового типу:
а – формату 12×12 м; б – формату $4,1 \times 2,5$ м; в – формату 8×2 м;
г – з нагнітанням суміші в екструдер бетононасосами

Мета статті – порівняльний аналіз характеристик та показників роботи варіантних конструкцій 3D-принтерів мостового типу.

Результати дослідження. Розглядалися такі варіанти виконання 3D-принтерів мостового типу:

- принтер фірми «Спецавіа» S-4063 (P₁);
- принтер НПП «Будресурс» (P₂);
- удосконалений принтер (P₃).

Розглянемо конструктивне виконання кожного з 3D-принтерів.

3D-принтер фірми «Спецавіа» S-4063 (P₁) містить (рис. 6 а) опорні стійки з рейками, на яких через механізми переміщення встановлена балка, і з штангою та екструдером [2]. Технічні показники принтера наведені у таблиці 1. Недолік цього принтера – малий прогін мостової балки (5,2 м), що не забезпечує повного

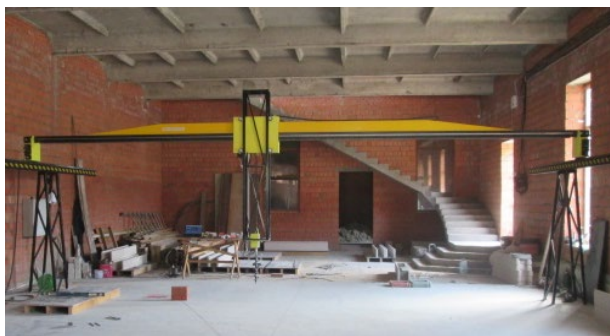
використання робочого простору виробничого приміщення.

Принтер науково-промислового підприємства (НПП) «Будресурс» (P₂) має (рис. 6 б) збільшений до 8 м прогін поперечної балки, що дозволяє повністю використати робочий простір виробничого приміщення, та збільшений до 30 мм розмір вихідного отвору (сопла насадки) екструдера [10]. Як робоче обладнання використовується екструдер, у бункері якого встановлений шнек із лопаттю та приводом. Подача з бункера виконується примусово за рахунок обертання шнека та лопаті. На екструдері встановлюють різні види насадок (сопла) залежно від технологічних вимог виготовлення виробів.

Заповнення екструдера сумішшю у всіх трьох принтерах, що розглядаються, виконується вручну.



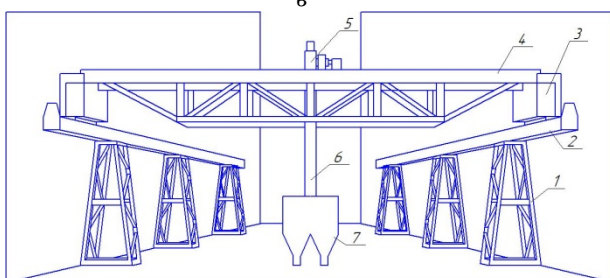
а



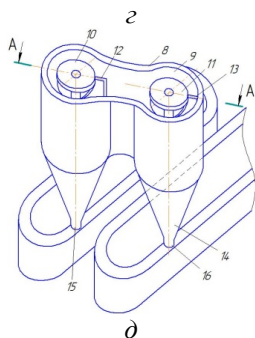
б



в



г



д

Рис. 6. Принтери мостового типу:
а – фірми «Спецавіа» S-4063; б – НПП «Будресурс»;
в – вироби; г – схема удосконаленої конструкції;
д – процес друку з використанням удосконаленого екструдера

НПП «Будресурс» проаналізувало ринок будівельних запитів та зробило висновок про доцільність 3D-друку окремих елементів споруд у виробничому приміщенні, зокрема, огорож для різних цілей (рис. 6 в). Недолік виготовлення таких виробів – це відносно невисока продуктивність обладнання, тому що одночасно виконується укладання тільки одного шару суміші.

Фахівці Придніпровської державної академії будівництва та архітектури запропонували **удосконалену конструкцію принтера (Р₃)** [11], в якому на опорних стійках 1 та рейках 2 встановлені поздовжні 3 та поперечні 4 балки з візком 5, штангою 6 та екструдером 7 (рис. 6 г). Екструдер 14 (рис. 6 д) виконаний з двома вихідними отворами 15 та 16, розташованими паралельно, причому в корпусі встановлено додатковий шнек 11, розташований напроти одного з вихідних отворів 16 та з'єднаний із двигуном. Характеристика принтера наведена у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики 3D-принтерів, які досліджувалися

Параметр	Варіант принтера		
	P ₁	P ₂	P ₃
Робоча зона, м	3,5×5,2	3,5×8,0	3,5×8,0
Площа робочої зони, м ²	18	28	28
Робоча швидкість, м/хв	8	8	8
Розмір шару бетону, мм	8 × 20	8 × 30	8 × 30 × 2
Потужність, кВт	1,3	1,3	1,3
Габарити: довжина, мм	4 100	4 100	4 100
ширина, мм	6 000	8 200	8 200
висота, мм	2 500	2 500	2 500
Маса, кг	1 770	1 840	1 875
Вартість, тис.грн	451,4	462,2	468,7

За дії обертання шнеків 10 і 11 суміш одночасно нагнітається скрізь вихідні отвори 15 і 16 екструдера 16 та утворює шари будівельної суміші відповідно 26 та 27 на декількох виробках (рис. 7). Це дозволяє підвищити продуктивність укладання бетону та виготовлення будівельних виробів. Таким

чином відбувається друкування декількох виробів одночасно до їх необхідної висоти.

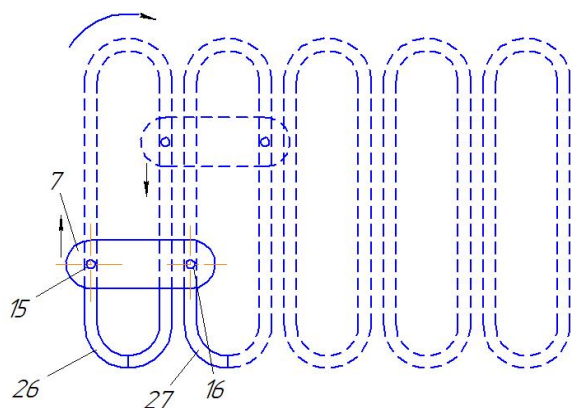


Рис. 7. Процес друку виробів 3D-принтером удосконаленої конструкції

Оцінювання кожного з варіантів обладнання 3D-принтерів виконуємо за трьома показниками:

1. Експлуатаційна продуктивність за годину P_{zi} :

$$P_{zi} = 60 \cdot V_p \cdot h_{ш} \cdot b_{ш} \cdot \kappa_e, \quad (1)$$

де V_p – робоча швидкість руху екструдера, м/хв; $h_{ш}$ – висота шару бетона, м; $b_{ш}$ – ширина шару бетона, м; κ_e – коефіцієнт використання обладнання за часом, $\kappa_e = 0,85$.

2. Металомісткість M_i :

$$M_i = \frac{m_i}{P_{zi}}, \quad (2)$$

де m_i – маса обладнання.

3. Собівартість друку 1 м^3 виробів за рік C_{pi} :

$$C_{pi} = C_i / P_{zi} t_p, \quad (3)$$

де t_p – тривалість роботи обладнання за рік за двозмінної роботи, $t_p = 3\,400$ годин.

Розрахунок показників для кожного з варіантів виконання принтерів наведений в таблиці 2, а також у вигляді графічних залежностей (рис. 8).

Аналіз розрахунків показників розглянутих варіантів 3D-принтерів показав, що використання удосконаленого принтера дозволить в 1,9...2,7 раза зменшити собівартість виготовлення 1 м^3 виробів та в 1,8...2,6 раза зменшити металомісткість порівняно з іншими видами 3D-принтерів. Це досягається за рахунок

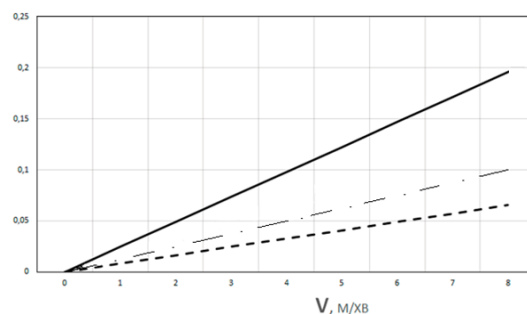
більшої продуктивності удосконаленого обладнання.

Таблиця 2

Результати розрахунків показників 3D-принтерів, які досліджувалися

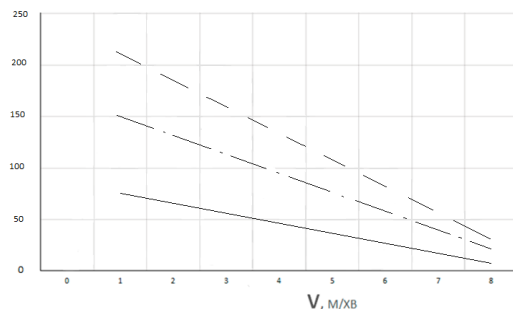
Варіант виконання принтера	Продуктивність, P_{zi} , $\text{м}^3/\text{год}$	Металомісткість M_i , $\text{т год}/\text{м}^3$	Собівартість друку 1 м^3 виробів за рік, C_{pi} , тис.грн рік/ м^3
P ₁	0,0653	27,12	2,03
P ₂	0,098	18,78	1,39
P ₃	0,1959	9,57	0,7

P_{zi} , $\text{м}^3/\text{год}$



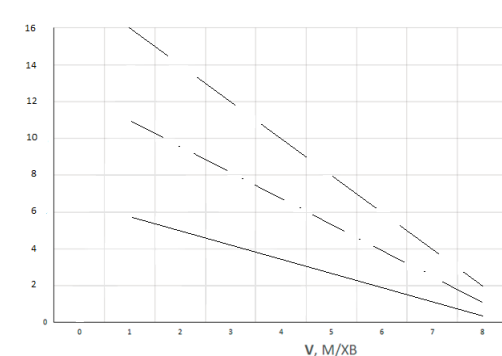
а

M_i , $\text{т год}/\text{м}^3$



б

C_{pi} , тис.грн рік/ м^3



в

Рис. 8. Залежності показників 3D-принтерів від їх виконання та швидкості руху екструдера V_p : а – продуктивності P_{zi} ; б – металомісткості M_i ; в – собівартості виготовлення 1 м^3 виробів за рік C_{pi} ; --- P₁; -.-.- P₂; - - - - P₃

Висновки. 1. До інноваційних технологій у будівництві належить 3D-друк об'єктів різного призначення.

2. Розглянуто різні типи будівельних 3D-принтерів мостового типу, які мають недоліки та вимагають удосконалення.

3. Розроблено удосконалену конструкцію 3D-принтера, яка забезпечує одночасний друк декількох виробів.

4. Аналіз показників розглянутих варіантів 3D-принтерів показав, що використання удосконаленого принтера дозволить в 1,9...2,7 раза зменшити собівартість виготовлення 1 м³ виробів та в 1,8...2,6 раза зменшити металомісткість порівняно з іншими принтерами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрійчук О. В., Оласюк П. Я. Застосування технології 3D-друку в будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві*. 2015. Вип. 3. С. 11–18.
2. Савицький М., Айріх Ш., Халаф І. та ін. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3D-друку будівельних об'єктів : колективна монографія; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. Савицького. Дніпро : ФОП Удовиченко О. М., 2019. 233 с.
3. Будко А. А., Потехин А. А., Акопян А. А. Применение 3D-принтеров в строительстве: достоинства и недостатки технологии : сб. науч. тр. Красноярск : Инновационный центр развития образования и науки, 2017. С. 112–119.
4. Левинская А. Стройка 3D. URL: <https://www.rbc.ru/magazine/2017/06/592567559a7947e1bb4b7ea9>
5. Литвиненко Ю. М., Остапенко С. О., Рогозинський А. А., Солонін Ю. М. Ручна версія 3D-друкування. *Science and innovation*. 2019, Вип. 15(5), С. 78–83 URL: <http://scinneng.org.ua/sites/default/files/pdf/2019/N5/Lytvynenko.pdf>.
6. Лунева Д. А., Кожевникова Е. О., Калюшина С. В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития. *Вестник Пермского национального исследовательского университета. Строительство и архитектура*. 2017. Т. 8, № 1. С. 90–101.
7. Савицький М. В., Конопляник О. Ю., Мислицька А. О., Лясота О. М. Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3D-друку будівельних конструкцій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 2. С. 59–68. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/201966>.
8. Торшин А. О., Потапова Е. Н. Перспективы использования 3D-принтера в строительстве. *Успехи в химии и химической технологии*. ТОМ XXX, № 7. Москва, 2016. С. 118–120.
9. Шатов С. В., Савицкий Н. В., Карпушин С. А. Обобщение инновационных технологий 3D-печати строительных объектов для разработки стартапов. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. Вып. 99. 2017. С. 194–200.
10. Шатов С. В., Савицький М. В., Марченко І. О. Удосконалення обладнання 3D-друку об'єктів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. 6. С. 90–101. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/192233>.
11. Патент України № 144178; опубл. 10.09.2020; Бюл. № 17. 5 с.
12. Khoshnevis B. Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies. *Automation in Construction*. 2004. Vol. 13, iss. 1. Pp. 5–19. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580503000736>.
13. Lipson H. Fabricated. The New World of 3D Printing. Hod Lipson, Melba Kurman. [Indiana] : Wiley, 2013. 320 p.
14. Savytskyi N. V., Shatov S. V., Ozhyshchenko O. A. 3D-printing of build objects. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 3. С. 18–26.
15. Joop de Boer Which Architect Is Winning The 3D Printing Rat Race? Pop-Up City. 2014. 1 July. URL: <http://popupcity.net/which-architect-is-winning-the-3d-printing-rat-race/>.

REFERENCES

1. Andriichuk O.V. and Olasiuk P.Ya. *Zastosuvannia Tekhnolohii 3D-Druku V Budivnytstvi* [Application of 3D printing technology in construction]. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunku v budivnytstvi* [Modern technologies and methods of calculation in construction]. 2015, iss. 3, pp. 11–18. (in Ukrainian).
2. Savytskyi M., Airikh Sh., Khalaf I. Z. and oth. *Arkhitekturno-konstruktyvno-tekhnolohichna systema 3d-druku budivelnykh ob'ektiv : kolektyvna monohrafiia za zah. red. d-ra tekhn. nauk, prof. M. Savytskoho* [The architectural-constructive-technological system of the construction objects 3D-printing: collective monograph; gen. ed. by prof. M. Savytskyi]. Dnipro: FOP Udovychenko O.M., 2019, 233 p. (in Ukrainian).

3. Budko A.A. *Primenenie 3D-printerov v stroitel'stve, dostoistva i nedostatki technology : sbornik nauchnykh trudov* [The use of 3D printers in construction, the advantages and disadvantages of technology : coll. of scient. papers]. Krasnoyarsk : Innovation Center for the Development of Education and Science, 2017, pp. 112–119. (in Russian).
4. Levinskaya A. Stroyka 3D [Building 3D]. URL: <https://www.rbc.ru/magazine/2017/06/592567559a7947e1bb4b7ea9> (in Russian).
5. Lytvynenko Yu.M., Ostapenko S.O., Rohozynskyi A.A. and Solonin Yu.M. *Ruchna versiiia 3D-drukuvannia*, [Manual version of 3D printing]. Science and Innovation. 2019, iss. 15 (5), pp. 78–83. URL: <http://scinneng.org.ua/sites/default/files/pdf/2019/N5/Lytvynenko.pdf>. (in Ukrainian).
6. Luneva D.A. *Primenenie 3D-pechati v stroitel'stve i perspective razvitiyi* [The use of 3D printing in construction and the prospects for its development]. *Vesnik Perskogo nachionalnogo isledovatel'skogo universiteta* [Bulletin of Perm National Research University]. 2017, iss. 8, no. 1, pp. 90–101. (in Russian).
7. Savytskyi M., Konoplianyk O., Myslytska A. and Liasota O. *Vyznachennia fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk betoniv dlia 3D-druku budivelnnykh konstrukttsii* [Determination of physical and mechanical characteristics of concrete for 3D-print building structures]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, iss. 2, pp. 59–68. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/201966>. (in Ukrainian).
8. Torchin A.O. *Perspective ispolzovaniy 3D-printera v stroitel'stve* [Prospects for using a 3D printer in construction]. *Uspechi v khimii i khimicheskoy technology* [Advances in Chemistry and Chemical Technology]. 2016, iss. XXX, no. 7, pp. 118–120. (in Russian).
9. Shatov S.V., Savytskyi N.V. and Carpushin S.A. *Obobchenie innovatsionnykh technology 3D-pechati stroitel'nykh obektov gly razrabotki startapov* [Generalization of innovative technologies for 3D printing of building objects for the development of start-ups]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashynostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2017, iss. 99, pp. 194–200. (in Russian).
10. Shatov S.V., Savytskyi M.V. and Marchenko I.O. *Udoskonalennia obladnannia 3D-druku ob'ektiv* [The improving 3D printing equipment]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, iss. 6, pp. 90–101. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/192233>. (in Ukrainian).
11. Patent UA no. 144178; published 10.09.2020; bulletin no. 17, 2020, 5 p. (in Ukrainian).
12. Khoshnevis B. Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies. *Automation in Construction*. 2004, vol. 13, iss. 1, pp. 5–19. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580503000736>.
13. Lipson H. *Fabricated. The New World of 3D Printing*. Hod Lipson, Melba Kurman. [Indiana] : Wiley, 2013, 320 p.
14. Savytskyi N.V., Shatov S.V. and Ozhyschenko O.A. 3D-printing of build objects. *Visnyk Prydniprovskoy derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 3, pp. 18–26.
15. Joop de Boer. Which Architect Is Winning The 3D Printing Rat Race? Pop-Up City. 2014, 1 July. URL: <http://popupcity.net/which-architect-is-winning-the-3d-printing-rat-race/>.

Надійшла до редакції: 02.02.2022.