

УДК 666.972.16:621.7

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК 3D ПРИНТЕРА НА ЯКІСТЬ ЕКСТРУЗІЇ**INFLUENCE OF 3D PRINTER DESIGN CHARACTERISTICS ON EXTRUSION QUALITY**

Макаренко Р.М., к.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-4839-9623, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Makarenko Ruslan, Ph.D., professor, ORCID: 0000-0003-4839-9623, (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

У роботі досліджено вплив швидкості переміщення сопла та швидкості подачі суміші на якість формування екструзійного шару 3D-принтером. Дослідження виконано з використанням методів планування експерименту за двофакторним тривірневим планом. Як досліджуваний критерій обрано показник якості екструзії, що характеризує стабільність потоку, однорідність укладання шару та геометричну рівність надрукованої конструкції або споруди. За результатами експериментально-статистичної обробки отримано адекватну регресійну модель другого порядку, яка описує нелінійний характер впливу досліджуваних факторів та їх взаємодію. Встановлено існування області раціональних режимів екструзії, за яких забезпечується висока якість формування шару. Показано, що узгоджене регулювання швидкості руху сопла та швидкості подачі суміші є необхідною умовою стабільності процесу та підвищення якості адитивного виготовлення будівельних конструкцій.

Concrete and mortar mixtures used in construction-scale 3D printing must meet a set of specific requirements dictated by the nature of additive manufacturing processes. A key prerequisite for achieving high-quality printed structures is the complementary interaction between the rheological properties of the construction mixture and the technological characteristics of the 3D printer. The overall quality of 3D printing is a multifactorial indicator formed under the influence of mechanical, technological, and control-related parameters of the printing system. Among these, extrusion-related parameters—particularly nozzle travel speed and material feed rate—play a

decisive role. This study investigates the influence of nozzle movement speed and construction mixture feed rate on the quality of extrusion during construction 3D printing. The experimental program was carried out using a laboratory-scale 3D printer and designed according to a two-factor, three-level experimental plan. The extrusion quality index was adopted as an integral response parameter, enabling a comprehensive assessment of flow stability, layer uniformity, and geometric consistency of the printed filament.

Experimental results were processed using statistical methods of design of experiments, resulting in the development of an adequate second-order regression model. The model reveals a nonlinear relationship between the technological parameters and extrusion quality, as well as a significant interaction effect between nozzle speed and material feed rate. An excessive increase in nozzle travel speed without a corresponding adjustment of the feed rate leads to extrusion discontinuities and reduced interlayer adhesion, while overly high material feed rates cause flow instability and geometric deformation of the printed layer. The proposed mathematical model enables quantitative prediction of extrusion quality within the investigated parameter range and can be effectively used for optimizing 3D printing process parameters. The obtained results contribute to improving the stability of the additive manufacturing process and enhancing the structural quality of construction elements produced by 3D printing technologies.

Ключові слова: портландцемент, 3D-будівельний принтер, екструзія, швидкість руху сопла, якість екструзії, планування експерименту. Portlandcement, 3D construction printer, extrusion, nozzle travel speed, extrusion quality, design of experiments.

Вступ. Бетонні або розчинові суміші, які використовуються при 3D друці, повинні відповідати певним важливим критеріям, які безпосередньо пов'язані з адитивними технологіями. Для них, важливо забезпечити взаємодоповнюючий зв'язок між параметрами будівельної суміші та 3D принтеру. Якість 3D-друку є багатофакторним показником, що формується під впливом конструктивних, технологічних та програмних характеристик 3D-принтера [1]. До основних конструктивно-технологічних параметрів, які визначають якість, міцність і конструкційні властивості зведених конструкцій та споруд, належать механічна точність системи позиціонування, параметри екструзії, роздільна здатність, а також стабільність керування процесом друку швидкість руху сопла, швидкість перемішування та подачі суміші [2]

Стан питання та задачі дослідження.

Швидкість руху сопла та швидкість подачі будівельної суміші є визначальними технологічними параметрами процесу 3D-друку будівельних конструкцій. Вони безпосередньо впливають на формування екструзійного шару, точність відтворення проектної геометрії, що в свою чергу визначає

якість надрукованої конструкції чи споруди [2, 3]. Рух сопла та подача матеріалу визначають форму та однорідність екструзійного шару, геометричну точність та міжшарову адгезію матеріалу: при збільшенні швидкості переміщення сопла без відповідної адаптації швидкості подачі матеріалу зростає ймовірність нерівномірної екструзії та дефектів шару, що призводить до зниження якості поверхні і механічних характеристик конструкції [3, 4]. Аналіз літературних джерел показує, що співвідношення між швидкістю руху сопла та швидкістю виходу матеріалу (коефіцієнт V_c/V_p), а також висота підняття сопла від нижнього шару істотно визначає форму перерізу та однорідність шару: нижче співвідношення забезпечує більш рівномірну геометрію й кращу структурну цілісність надрукованого елемента [5]. Крім того, оптимізація параметрів екструзії, зокрема швидкість руху сопла, а також швидкість подачі матеріалу є предметом поточних наукових досліджень у галузі адитивного будівництва, включаючи математичне моделювання [6] та експериментальні дослідження, спрямовані на підвищення стабільності процесу та якості надрукованих бетонних елементів [7].

В літературі також наголошується на необхідності точного контролю технологічних параметрів 3D-друку для забезпечення ефективного використання цієї технології в будівництві, зокрема через удосконалення обладнання, процесів екструзії та параметрів подачі суміші, що сприятиме підвищенню якісних показників надрукованих споруд і конструкцій [8, 9].

Таким чином дослідження впливу швидкості руху сопла на якість формування при змінній швидкості подачі суміші є актуальним.

Мета роботи полягала у кількісному встановленні особливостей впливу швидкості руху сопла на якість формування при змінній швидкості подачі суміші.

Матеріали, які були використані в дослідженнях:

- портландцемент ПЦ П/А-Ш-500 Р-Н, згідно ДСТУ Б EN 197-1:2015 виробництва ПрАТ ВІПЦЕМ, м. Здолбунів;
- дрібний заповнювач кварцовий пісок згідно ДСТУ Б В.2.7-32-95, Славутського кар'єру (Хмельницької області) з $M_{кр} = 2,1$;
- суперпластифікатор (СП) полікарбоксілатного типу Melflux 2651F відповідно до ДСТУ Б В.2.7-171:2008, BASF, Німеччина

Методи досліджень.

Основні дослідження були виконані з використання лабораторного 3D принтеру розробленого на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП (рис. 1).

Для достовірної реалізації дослідів, технологічного аналізу й оптимізаційних рішень використовували метод математичного планування експериментів (МПЕ) [10]. Результати дослідів оброблялися за допомогою методів математичної статистики.

Отримані результати та їх аналіз.

Для визначення впливу параметрів 3D принтеру, зокрема швидкості руху сопла (V_c) та швидкості подачі будівельної суміші ($V_{п}$), яку можна оцінити

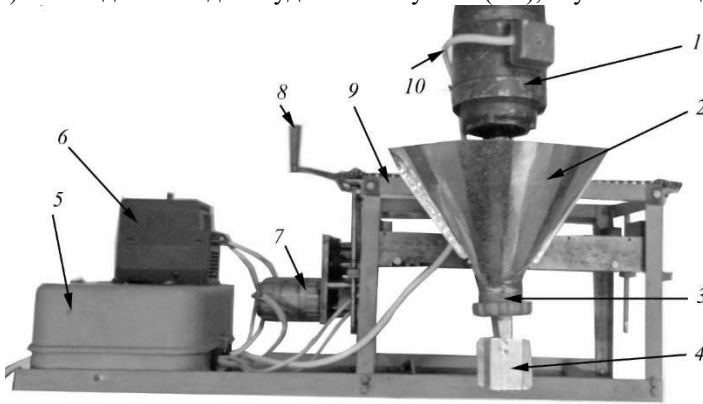


Рис. 1. Лабораторний принтер: 1 – електродвигун екструдера; 2 – бункер розчинної суміші; 3 – шнек; 4 – змінне сопло; 5 – пульт управління; 6 – перетворювач частоти електричного струму; 7 – реверсний електродвигун переміщення екструдера в горизонтальному напрямку; 8 – ручний привід переміщення екструдера у вертикальному напрямку; 9 – станина; 10 – кабель живлення електродвигунів

по її об’єму за одиницю часу (продуктивністю перекачувальної установки), на якість формування, були виконані алгоритмізовані експерименти у відповідності до двохфакторного трьохрівневого плану B_2 [10]. Швидкість подачі в дослідженнях регулювали зміною швидкості обертання шнека подачі суміші ($V_{ш}$). Відповідно до цього умови планування експериментів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експериментів

Технологічні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Швидкість переміщення сопла, мм/с (V_c)	X_1	50	125	200	75
Швидкість обертання шнека об/хв ($V_{ш}$)	X_2	60	120	180	60

Фактори варіювалися в межах технологічно допустимих значень відповідно до умов стабільної роботи 3D принтера. Для аналізу впливу факторів на показник якості екструзії з використання методу планування експерименту була побудована регресійна модель другого порядку, що дозволяє врахувати як лінійні, так і нелінійні ефекти, а також взаємодію між

факторами [10]. Як досліджуваний параметр обрано показник якості екструзії (ПЕ), який комплексно характеризує стабільність екструзії та однорідність укладання шару екструдованої суміші. Для цього використано умовну шкалу згідно, яка наведена в табл. 2 [2]. На основі даної таблиці маємо, що оцінки 1, 2 та 3 бали не дають змогу використовувати значення змінних параметрів 3D принтеру для якісного екструзійного формування будівельною сумішшю. Відповідні характеристики принтера, які мають оцінку 5 балів забезпечують якісне формування при зведенні будівель. Параметри принтера, що відповідають оцінці 4 бали мають певні недоліки, які можуть бути прийнятними, при умови, що конструкція чи будівля відповідатиме необхідним проєктним міцнісним показникам та вимогам до зовнішнього вигляду.

Таблиця 2

Шкала оцінювання якості екструзії суміші з сопла принтера.

Бал	Опис
1	Екструзія з утворенням суттєвих дефектів (розривів, напливів), що не дозволяють формувати конструкцію.
2	Екструзія з утворенням незначних розривів та напливів на прямолінійних та заокруглених ділянках друку, що не дозволяє друкувати конструкцію.
3	Задовільна екструзія зі змінною геометрією шару (нерівномірна товщина та висота шару), а також утворення порожнин (неповне заповнення сумішшю перерізу шару), яка не дозволяє друкувати конструкції чи споруди на всю висоту безперервно, оскільки порушується геометрія накладених шарів, що призводить до руйнування.
4	Якісна екструзія суміші на прямолінійних ділянках та утворення розривів та напливів на заокруглених ділянках друку. Дані недоліки можуть бути прийнятними, за умови, що конструкція чи будівля відповідатиме міцнісним вимогам та зовнішньому вигляду.
5	Якісна екструзія суміші як на прямолінійних так і на заокруглених ділянках друку

Матриця планування та отримані кількісні оцінки експериментальних результатів наведені в табл. 3.

У ході досліджень у кожній точці плану для оцінки впливу варійованих факторів готували суміші, які придатні для екструзійного формування на лабораторному принтері, суміш містила ПЦ, пісок кварцовий та суперпластифікатор полікарбоксилатного типу для покращення екструзійних характеристик у наступному співвідношенні компонентів ПЦ:Пісок – 1:3 (по масі) та 0,2% СП від маси цементу. В/Ц при цьому було 0,45. Слід відмітити,

що витрата води підбиралася для досягнення розпливу конуса на струшуючому столику 205..215 мм.

Після статистичної обробки результатів експериментів (табл. 3), було отримано коефіцієнти рівнянь регресії на основі яких побудовано адекватну математичну модель другого порядку, яка визначає вплив параметрів 3D принтеру, зокрема швидкості руху сопла (V_c) та швидкості обертання шнека подачі суміші ($V_{ш}$) на якість екструзії, які можна розглядати як характеристики їх впливу на якісні показники конструкції або будівлі в певному діапазоні варіювання досліджуваних факторів.

Таблиця 3

Матриця планування та отримані експериментальні результати

№ п/п	Кодовані значення		Натуральні значення		Оцінка, балів
	X_1	X_2	V_c , мм/с	$V_{ш}$, об/хв	
1	1	1	200	180	4
2	1	-1	200	60	2
3	-1	1	50	180	1
4	-1	-1	50	60	4
5	1	0	200	120	2,5*
6	-1	0	50	120	3
7	0	1	125	180	3
8	0	-1	125	60	2
9	0	0	125	120	4,5*
10	0	0	125	120	5
11	0	0	125	120	5

Примітка – показник екструзійності не можна було віднести до конкретної оцінки.

Математична модель, яка визначає вплив параметрів 3D принтеру на показник якості екструзії (ПЕ)

$$PE = 4,35 + 0,08X_1 + 0,02X_2 - 0,88X_1^2 - 1,08X_2^2 + 1,25X_1X_2 \quad (1)$$

Аналіз лінійних коефіцієнтів моделі свідчить, що збільшення швидкості руху сопла (X_1) та швидкості обертання шнека (X_2) у межах досліджуваного діапазону позитивно впливає на якість екструзії. При цьому вплив швидкості руху сопла є більш вираженим, що підтверджується більшим значенням відповідного коефіцієнта.

Наявність від'ємних квадратичних членів у моделі вказує на нелінійний характер процесу екструзії та існування оптимальних значень обох факторів. Надмірне збільшення швидкості руху сопла призводить до розриву екструдованої нитки та погіршення адгезії між шарами, тоді як занадто висока швидкість подачі суміші зумовлює нестабільність потоку та деформацію геометрії шару.

Досить значний позитивний коефіцієнт взаємодії X_1X_2 свідчить про суттєвий ефект узгодженого регулювання швидкості руху сопла та подачі

суміші. Це означає, що оптимальна якість екструзії досягається не шляхом ізольованого налаштування окремих параметрів, а за умови їх взаємної відповідності.

Таким чином, побудована математична модель дозволяє визначити раціональні режими екструзії будівельної суміші та може бути використана для оптимізації процесу 3D-друку з метою підвищення якості формування будівельних елементів і стабільності адитивної технології виробництва.

Для більш повного аналізу отриманої експериментально-статистичної моделі була побудована поверхня відгуку (рис. 2), яка відображає вплив параметрів 3D принтеру на якість екструзії.

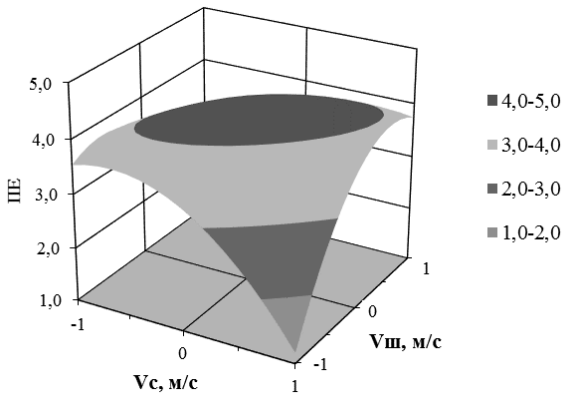


Рис. 2. Поверхня відгуку, що ілюструє вплив параметрів 3D принтеру на якість екструзії

Аналіз поверхні відгуку підтверджує наявність області оптимальних режимів екструзії, в якій показник якості перевищує граничне значення $PE \geq 4$. Максимальні значення показника спостерігаються при середніх значеннях швидкості переміщення сопла та швидкості обертання шнека, що узгоджується з результатами аналітичної оптимізації

Висновки.

У результаті проведених досліджень встановлено закономірності впливу швидкості руху сопла та швидкості подачі будівельної суміші на якість екструзії в процесі будівельного 3D-друку.

За допомогою методів планування експерименту отримано адекватну регресійну модель другого порядку, яка дозволяє кількісно оцінювати показник якості екструзії залежно від досліджуваних технологічних параметрів та може бути використана для оптимізації параметрів процесу та підвищення ефективності адитивного виготовлення будівельних конструкцій.

Встановлено позитивний ефект взаємодії швидкості руху сопла та швидкості подачі суміші, що підтверджує необхідність їх узгодженого регулювання для забезпечення стабільного формування екструдованого шару.

1. Perrot A., Rängeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, 2016. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0848-4>.
2. Марчук В.В., Дворкін Л.Й., Макаренко Р.М. Вплив параметрів та критерій визначення якості екструзії при 3D-друці. *Вісник НУВГП. Технічні науки. Том 3 № 113 (2026)*.
3. Hager, I.; Golonka, A.; Putanowicz, A. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Proc. Eng.* 2016, Vol. 151, pp. 292–299.
4. Nan Zhang, Jay Sanjayan, «Extrusion nozzle design and print parameter selections for 3D concrete printing», «*Cement and Concrete Composites*» (2023).
5. «Sanjayan J., Nematollahi B., Xia M., Marchment T. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 2018.
6. «Dong An, Mahfuzur Rahman, Y.X. Zhang, Richard (Chunhui) Yang, Effects of Key 3D concrete printing process parameters on layer shape: Experimental study and Smooth Particle Hydrodynamics modelling, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 22,2025, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04718>.
7. Havryliak S.A. New technologies in the field of construction. Using 3D printers», // *Theory and building practice. видавництво Львівської політехніки.- 2021. - Вип. 3, №. 1. - С. 15-22.*
8. Buswell R.A., Leal de Silva W., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
9. Savytskyi M.V., Shatov S.V., Ozhyshchenko O.A., «3D-друк будівельних об'єктів», «*Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*». 2020. Вип. 2, С. 59–68.
10. Dvorkin, L.; Dvorkin, O.; Ribakov, Y. *Mathematical experiments planning in concrete technology*. Nova Science Publishers: New York, USA, 2011, 173 p.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	28.03.2026	Received	28.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	01.04.2026	Received in revised form	01.04.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.