

Херсонський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерії та транспорту

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Автоматизації, робототехніки і мехатроніки

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавра

на тему: Удосконалення 3D принтера типу AMT-6044 Long для
будівництва

Пояснювальна записка

Виконав: студент 4 курсу, групи 4М
Спеціальності 133-Галузеве
машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

Гладкий Д. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Осадчук В.С.

Хмельницький – 2025

Херсонський національний технічний університет

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Гладкому Денису Сергійовичу

1. “Удосконалення 3D принтера типу АМТ-6044 Long для будівництва”

Керівник проекту (роботи) Осадчук Василь Сергійович

(призвіще, ім'я, по батькові наукова ступінь, вчене звання)

Затвердженні наказом вищого навчального закладу від ?? січня 2025 року № 17-с.

3) Вихідні дані до роботи: Для виконання дипломної роботи використовуються технічна документація на 3D-принтер АМТ-6044 Long, результати аналізу його конструкції та функціонування, каталоги сучасних будівельних 3D-принтерів, характеристики друкуючих головок, дані щодо будівельних матеріалів для адитивного виробництва, а також нормативна документація з енергоефективності, екологічності та безпеки. Додатково враховуються актуальні дані про впровадження технологій 3D-друку в будівництві, приклади реалізованих проектів, а також вимоги до якості, швидкості та точності друку. Враховано також економічні показники доцільності використання модернізованих компонентів принтера.

4) Зміст роботи: У роботі передбачено виконання огляду сучасних технологій 3D-друку в будівництві та аналізу технічних характеристик принтера АМТ-6044 Long. Виконано виявлення недоліків існуючої конструкції друкуючої головки, розроблено технічне завдання на її модернізацію. Проведено розрахунки навантажень, продуктивності, точності та енергоефективності вдосконаленого вузла. Описано конструктивні зміни, обґрунтовано вибір матеріалів і метод виготовлення, підбрано обладнання та інструменти для виготовлення нових деталей. Проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності модернізації,

розглянуто питання безпеки та охорони праці під час експлуатації 3D-принтера.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломної Роботи	Срок виконання етапів роботи	
1	Вибір теми, отримання завдання, формування структури диплома	05.02.2025 – 07.02.2025	
2	Написання вступу, формулювання мети, об'єкта, предмета, методів дослідження	08.02.2025 – 12.02.2025	
3	Опрацювання теоретичних розділів (розділи 1–3: огляд літератури, технології 3D-друку, матеріали, переваги та приклади)	13.02.2025 – 24.02.2025	
4	Підготовка до основної частини: аналіз принтера АМТ-6044 Long, недоліки базової головки	25.02.2025 – 01.03.2025	
5	Удосконалення друкуючої головки (розділ 4.1–4.7): конструкція, принцип дії, вибір матеріалів, масштабування, висновки	02.03.2025 – 01.05.2025	
6	Техніко-економічне обґрунтування (розділ 5)	02.05.2025 – 06.05.2025	
7	Розділ 6. Охорона праці, екологічна безпека	07.05.2025 – 10.05.2025	
8	Узагальнюючі висновки, оформлення ілюстрацій, таблиць.	11.05.2025 – 15.05.2025	
9	Перевірка керівником, внесення правок, остаточне оформлення роботи	16.05.2025 – 08.06.2025	
10	Підготовка до захисту	09.06.2025 – 10.06.2025	

Реферат

У даній кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження інноваційної технології будівельного 3D-друку, її практичної реалізації на прикладі принтера типу АМТ-6044 Long, а також технічного удосконалення одного з ключових його вузлів — друкуючої головки. У межах дослідження було опрацьовано широкий спектр питань: від історії розвитку 3D-друку в архітектурі й будівництві — до аналізу сучасних матеріалів, технологічних рішень, економічної доцільності та забезпечення безпечної експлуатації.

У вступній частині обґрунтовано актуальність теми в контексті сучасних викликів у будівельній галузі, зокрема необхідності швидкого відновлення житла, зменшення екологічного навантаження, підвищення ефективності праці та оптимізації ресурсів. 3D-друк виявився інноваційним підходом, що дозволяє вирішити значну частину цих проблем за рахунок автоматизації, точності, швидкості та гнучкості технологічного процесу. Об'єктом дослідження обрано саме технологію 3D-друку в будівництві, а предметом — її практичну реалізацію через удосконалення друкуючої головки.

У теоретичній частині роботи було детально проаналізовано сучасний стан розвитку 3D-друку в будівництві як у світовому, так і в українському контексті. Наведено приклади реалізованих проєктів, охарактеризовано основні технології друку: екструзійну, сегментну, роботизовану та інші. Також досліджено переваги і недоліки адитивного способу виготовлення будівель у порівнянні з традиційними методами. Окрему увагу приділено будівельним матеріалам, що використовуються в 3D-друці, їх властивостям, вимогам та перспективам розвитку. Усі ці дані створили ґрунтовну базу для подальших прикладних розробок.

Основною частиною дипломної роботи стала розробка та технічне обґрунтування удосконаленої друкуючої головки будівельного 3D-принтера (розділи 4.1–4.7). У цьому розділі виявлено головні недоліки базової конструкції, які обмежували ефективність роботи принтера: надлишкове накопичення залишків суміші, недостатня точність формування шару, обмеження в масштабуванні, складність обслуговування.

В результаті аналізу та проєктування була розроблена нова конструкція головки, яка передбачає:

- модульність конструктивних елементів, що дозволяє легко адаптувати систему до різних матеріалів і розмірів об'єктів;

- використання шнека зі змінною геометрією для оптимального перемішування суміші;
- впровадження електронної системи контролю та регулювання подачі компонентів;
- використання легких, корозійностійких матеріалів для зменшення навантаження на приводи;
- інтеграцію самоочисного механізму, що скорочує час на обслуговування між друками.

Модернізована друкуюча головка дозволяє підвищити точність нанесення матеріалу, зменшити втрати суміші, забезпечити рівномірність шару, а також пришвидшити весь процес друку без втрати якості. Важливо й те, що конструкція дає змогу легко масштабувати рішення для різних форматів будівництва — від малих архітектурних форм до повноцінних житлових будинків.

У п'ятому розділі наведено техніко-економічне обґрунтування, в якому продемонстровано, що модернізація не лише покращує технічні характеристики принтера, а й має пряму економічну вигоду. Завдяки автоматизації, зниженню витрат на обслуговування і підвищенню продуктивності, загальні витрати на зведення об'єктів зменшуються. Було проведено порівняння з традиційними методами будівництва, що показало перевагу вдосконаленої системи як за вартістю, так і за термінами реалізації.

У розділі шостому проаналізовано аспекти безпеки та охорони праці, які набувають особливого значення при використанні автоматизованих систем. Виявлено, що модернізована друкуюча головка зменшує потребу в прямому контакті оператора з рухомими або потенційно небезпечними вузлами, що підвищує загальний рівень безпеки. Описано потенційні ризики при експлуатації, розроблено заходи профілактики та запропоновано рекомендації щодо організації безпечного робочого середовища.

Загалом, дипломна робота показала, що удосконалення окремого вузла — у цьому випадку друкуючої головки — може мати значний мультиплікативний ефект для всього технологічного процесу 3D-друку в будівництві. Результати дослідження мають прикладну цінність і можуть бути використані для подальших наукових розробок, серійного впровадження обладнання або як база для стартапу в галузі адитивного будівництва.

Report

In this qualification work, a comprehensive study of the innovative technology of construction 3D printing, its practical implementation on the example of the AMT-6044 Long printer, as well as the technical improvement of one of its key components - the print head - was carried out. The study covered a wide range of issues: from the history of 3D printing in architecture and construction to the analysis of modern materials, technological solutions, economic feasibility, and safe operation.

The introductory part substantiates the relevance of the topic in the context of current challenges in the construction industry, including the need to quickly restore housing, reduce environmental impact, increase labor efficiency, and optimize resources. 3D printing has proved to be an innovative approach that allows solving a significant part of these problems through automation, accuracy, speed, and flexibility of the technological process. The object of the study is 3D printing technology in construction, and the subject is its practical implementation through the improvement of the print head.

The theoretical part of the paper analyzes in detail the current state of development of 3D printing in construction in both the global and Ukrainian context. Examples of completed projects are given, and the main printing technologies are characterized: extrusion, segmental, robotic, and others. The advantages and disadvantages of the additive manufacturing method of buildings compared to traditional methods are also explored. Special attention is paid to the building materials used in 3D printing, their properties, requirements, and development prospects. All this data created a solid basis for further applied developments.

The main part of the thesis was the development and technical justification of an improved print head for a construction 3D printer (Sections 4.1-4.7). This section identified the main shortcomings of the basic design that limited the efficiency of the printer: excessive accumulation of mixture residues, insufficient accuracy of layer formation, scaling limitations, and complexity of maintenance.

As a result of the analysis and design, a new head design was developed, which provides for modularity of structural elements, which makes it easy to adapt the system to different materials and sizes of objects;

use of a variable geometry auger for optimal mixing of the mixture;
implementation of an electronic system for monitoring and controlling the supply of components;
use of lightweight, corrosion-resistant materials to reduce the load on the drives;
integration of a self-cleaning mechanism that reduces maintenance time between prints.

The modernized print head improves the accuracy of material application, reduces mixture loss, ensures layer uniformity, and speeds up the entire printing process without compromising quality. It is also important that the design makes it easy to scale the solution for different building formats, from small architectural forms to full-fledged residential buildings.

The fifth section presents a feasibility study that demonstrates that the modernization not only improves the printer's technical characteristics but also has direct economic benefits. Thanks to automation, reduced maintenance costs, and increased productivity, the overall cost of building facilities is reduced. A comparison was made with traditional construction methods, which showed the superiority of the advanced system in terms of both cost and time.

Section six analyzes the health and safety aspects that are of particular importance when using automated systems. It was found that the modernized printhead reduces the need for direct operator contact with moving or potentially dangerous components, which increases the overall level of safety. Potential risks during operation are described, preventive measures are developed, and recommendations for organizing a safe working environment are offered.

In general, the thesis showed that improving a single component - in this case, the print head - can have a significant multiplier effect on the entire 3D printing process in construction. The results of the study are of applied value and can be used for further research and development, serial implementation of equipment, or as a basis for a startup in the field of additive manufacturing.

Вступ.....	9
1.1 Актуальність теми	
1.2 Мета і завдання дослідження	
1.3 Об'єкт і предмет дослідження	
1.4 Методи дослідження	
2.Огляд літератури та аналіз сучасного стану 3D-друку в будівництві.....	18
2.1 Історія розвитку 3D-друку в архітектурі та будівництві	
2.2 Основні технології 3D-друку, що застосовуються у будівництві	
2.3 Переваги та недоліки 3D-друку у порівнянні з традиційними методами	
2.4 Приклади реалізованих об'єктів: світовий та український досвід	
3.Технологічні особливості застосування 3D-друку у будівництві.....	36
3.1 Принцип роботи будівельного 3D-принтера	
3.2 Матеріали, що використовуються для друку конструкцій	
3.3 Загальні вимоги до конструкцій, виготовлених методом 3D-друку	
3.4 Підготовка до друку: проектування, моделювання, перевірка геометрії	
4.Удосконалення друкуючої головки будівельного 3D-принтера.....	55
4.1 Передумови до вдосконалення	
4.2 Конструктивні особливості вдосконаленої головки	
4.3 Переваги запропонованого рішення	
4.4 Принцип дії вдосконаленої головки	
4.5 Варіанти реалізації і вибір матеріалів	
4.6 Можливості масштабування та адаптації	
4.7 Висновки до розділу	

5.Техніко-економічне обґрунтування.....	73
5.1 Орієнтовна вартість будівництва 3D-друком	
5.2 Порівняння з традиційним будівництвом	
5.3 Потенціал економії ресурсів та часу	
5.4 SWOT-аналіз впровадження 3D-друку в Україні	
6.Охорона праці та безпека життєдіяльності.....	89
6.1 Можливі ризики при експлуатації 3D-друкарських систем	
Висновки.....	92
Список використаних джерел.....	94

Вступ

1.1 Актуальність теми

У сучасному світі будівельна галузь відіграє ключову роль у розвитку інфраструктури, забезпеченні населення житлом та покращенні якості життя. Проте традиційні методи будівництва в багатьох випадках не відповідають сучасним викликам: затрати часу і ресурсів залишаються високими, вплив на довкілля — значним, а темпи зведення об'єктів — недостатніми для швидкого покриття зростаючого попиту на житло. Особливо це стосується регіонів з постійним демографічним зростанням або країн, які відновлюються після збройних конфліктів чи природних катастроф.

На цьому тлі дедалі більшої актуальності набуває використання технологій 3D-друку у будівництві. Йдеться про адитивне виготовлення будівельних конструкцій за допомогою спеціалізованих принтерів, що формують об'єкт пошарово за цифровою моделлю. Такі системи дозволяють зводити будинки швидше, дешевше і точніше, ніж традиційними методами. До того ж, вони відкривають простір для створення нетипових форм, органічних дизайнів і функціонально орієнтованих рішень.

У глобальному контексті вже існують численні приклади успішного застосування цієї технології. Наприклад, у США надруковані цілі мікрорайони з невеликих приватних будинків; у Нідерландах реалізовано перший житловий проєкт з бетонних елементів, надрукованих на 3D-принтері; у Китаї надруковані багатоквартирні будинки для тимчасового проживання. Крім швидкості та економії, такі проєкти демонструють високу гнучкість у плануванні, зниження витрат на логістику матеріалів, а також зменшення відходів.

Для України ця тема є надзвичайно перспективною. З урахуванням потреб у швидкому та економічному відновленні зруйнованої інфраструктури, особливо після повномасштабного вторгнення РФ, впровадження 3D-друку в будівництві може дати потужний поштовх до розвитку житлової та соціальної інфраструктури. Крім того, такі технології дозволяють залучити українських інженерів, архітекторів

та ІТ-фахівців до створення конкурентоспроможних рішень на світовому ринку.

Таким чином, розробка та дослідження можливостей застосування 3D-друку для зведення житлових будинків є надзвичайно актуальним науково-технічним завданням. Ця технологія не лише спрощує процес будівництва, а й робить його більш доступним, екологічним і гнучким. У результаті ми отримуємо не просто споруди — а домівки, в яких дійсно хочеться жити.

1.2 Мета і завдання дослідження

Мета дослідження — обґрунтувати доцільність і технічну можливість застосування технології 3D-друку у житловому будівництві, а також розробити концепцію житлового будинку, адаптовану до адитивного способу виготовлення, з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, зручності та екологічності.

Реалізація поставленої мети передбачає виконання наступних завдань дослідження:

1. Провести аналіз сучасного стану технологій 3D-друку в будівництві, включаючи світовий та український досвід.
2. Дослідити основні види 3D-принтерів, які застосовуються для зведення будівель, їх технічні характеристики та принципи роботи.
3. Вивчити властивості будівельних матеріалів, що використовуються в 3D-друці, та визначити їх переваги і обмеження.
4. Сформувати архітектурно-конструктивну концепцію житлового будинку, придатного для 3D-друку, з урахуванням економічної доцільності.
5. Провести попередні розрахунки матеріальних витрат, етапів друку та тривалості будівництва.
6. Надати техніко-економічне обґрунтування застосування технології у порівнянні з традиційними методами будівництва.

7. Визначити ризики, пов'язані з використанням технологій 3D-друку, та розробити рекомендації з безпеки праці й екологічного захисту.



Рисунок 1 — Будівельний 3D - принтер в Циндао.

У процесі дослідження увага також буде приділятися тому, як саме 3D-друк може змінити уявлення про комфортне житло майбутнього — індивідуалізоване, доступне, інноваційне.



Рисунок 2 — інтер'єр надрукованого будинку або приклад унікального дизайну)

1.3 Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження у даній роботі є інноваційна технологія зведення житлових будинків за допомогою 3D-друку — адитивного методу, який дозволяє автоматизовано створювати повноцінні будівельні конструкції, застосовуючи спеціальні будівельні принтери та композитні будівельні суміші. Особливу увагу приділено будівництву приватного житла, як найбільш гнучкій і перспективній сфері впровадження цієї технології.

Предмет дослідження охоплює технічні, архітектурні та економічні аспекти впровадження технології 3D-друку в житлове будівництво, зокрема:

- технічні характеристики будівельних 3D-принтерів та принципи їх роботи;
- особливості матеріалів, що використовуються для друку (бетонні суміші, полімери, армування тощо);

- архітектурні підходи до формування простору в умовах друку (безперервність, округлі форми, мінімізація швів);
- формування проєктного рішення будинку, оптимізованого під 3D-друк;
- питання інженерної підготовки — розробка цифрової моделі, перевірка на друкопридатність, етапи виготовлення;
- порівняння ефективності 3D-друку з традиційними методами будівництва;
- оцінка потенціалу для використання технології в українських реаліях, включаючи нормативні бар'єри, логістику матеріалів, підготовку фахівців.

Таблиця 1 — Об'єкт і предмет дослідження та результати з межами дослідження.

Параметр	Опис
Об'єкт дослідження	Технологія 3D-друку в будівництві, включаючи обладнання, матеріали та процеси будівництва.
Предмет дослідження	Особливості застосування 3D-друку для створення житлових будинків, аналіз технологічних, екологічних та економічних аспектів.
Основні елементи дослідження	1. Принципи роботи будівельних 3D-принтерів 2. Матеріали для друку 3. Проектування будинків під 3D-друк 4. Техніко-економічне обґрунтування
Межі дослідження	Обмеження, пов'язані з використанням технології 3D-друку саме для житлового будівництва, без детального розгляду комерційних або промислових споруд.
Очікувані результати	Розробка концепції будинку, придатного для

	3D-друку, оцінка переваг і ризиків технології, економічна ефективність та рекомендації з безпеки.
--	---

Особливістю обраного предмету дослідження є його комплексний міждисциплінарний характер, що об'єднує інженерні технології, архітектурне проєктування, матеріалознавство, економіку та питання екологічної безпеки. Такий підхід дозволяє не лише описати технічну можливість побудови друківаних будинків, а й критично оцінити перспективи подальшого розвитку цієї технології в реальних умовах.

В рамках дипломної роботи також розглядається спрощений приклад житлового будинку, який може бути реалізований методом 3D-друку в індивідуальному будівництві. У цьому прикладі передбачається адаптація конструкцій до формування послідовними шарами без потреби в опалубці чи складній армувальній системі, а також орієнтація на простоту експлуатації та зменшення собівартості будівництва.

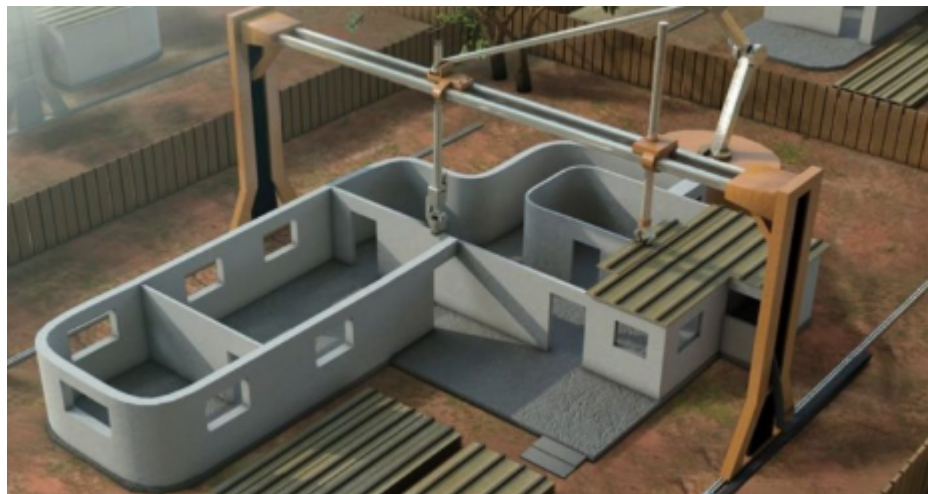


Рисунок 3 — приклад роботи будівельного 3D-принтера з нанесенням шарів суміші



Рисунок 4 —Голі стіни, надруковані методом 3D-друку

1.4 Методи дослідження

У процесі виконання дипломної роботи використовувався комплекс взаємопов'язаних методів дослідження, що дозволяють всебічно охопити технічні, архітектурні, економічні та практичні аспекти теми:

Аналіз літературних джерел та відкритих даних.

Проведено детальне вивчення сучасних публікацій, технічних статей, звітів, нормативної документації та прикладів реалізації проєктів будинків, надрукованих за допомогою 3D-технологій. Це дало змогу оцінити поточний стан галузі, її тенденції та технологічні можливості.

Порівняльний аналіз.

Здійснено порівняння характеристик 3D-друку та традиційного будівництва за такими критеріями: тривалість будівництва, витрати матеріалів, собівартість, трудозатрати, гнучкість проєктування, екологічність.

Таблиця 2 — Порівняльна характеристика методів дослідження у сфері 3D-друку в будівництві

Метод дослідж	Сутність методу	Переваги	Недоліки / Обмеження
---------------	-----------------	----------	----------------------

ення			
Теоретичний аналіз	Вивчення існуючих наукових джерел, нормативів, патентів, досліджень	Глибоке розуміння теми, виявлення проблем і перспектив	Залежить від актуальності джерел
Порівняльний аналіз	Порівняння 3D-друку з традиційним будівництвом за рядом показників	Дає змогу чітко виявити переваги та недоліки	Може потребувати точних даних для об'єктивності
Моделювання	Створення цифрових моделей будівель для подальшого аналізу та візуалізації	Дає змогу оцінити архітектурну форму та відповідність вимогам	Потребує спеціального ПЗ та навичок
Економічний розрахунок	Обчислення вартості проєкту, ефективності інвестування, амортизації	Практичне обґрунтування доцільності впровадження	Висока залежність від ринку та коливань цін
SWOT-аналіз	Визначення сильних, слабких сторін, можливостей та загроз	Системний підхід, зручний для планування	Потребує чіткої та об'єктивної оцінки
Практичне проєктування	Розробка концепції будинку, пристосованого до друку	Прикладна цінність, перевірка знань на практиці	Необхідність знань в CAD/3D-моделюванні

Метод проєктного моделювання.

Використано базові принципи архітектурного проєктування для формування концепції будинку, адаптованого до технології 3D-друку.

Проект включає урахування особливостей принтера, товщини шару, обмежень форми, технологічних швів та внутрішніх порожнин.

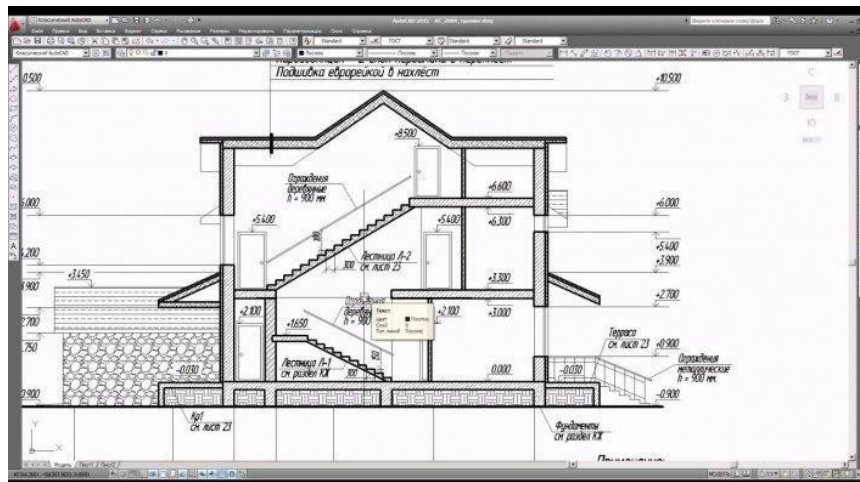


Рисунок 5 — ескізне планування будинку з розмірами для 3D-друку

Економічне моделювання.

Проведено приблизні розрахунки витрат на зведення об'єкта з урахуванням вартості матеріалів, роботи принтера, логістики, енергоспоживання та порівняння з аналогічними витратами при традиційному будівництві.

Системний підхід.

Усі елементи дослідження розглядаються як частини єдиної системи: від підготовки цифрової моделі до реального процесу будівництва і подальшої експлуатації. Це дозволяє забезпечити узгодженість між архітектурним задумом, технологічними можливостями та техніко-економічними показниками.

Візуалізація та графічне представлення.

У ході дослідження розробляються схеми, креслення, графіки, що відображають процеси та результати. Це полегшує сприйняття інформації та забезпечує наочність висновків.

Таким чином, застосування вказаних методів дозволяє створити цілісне бачення процесу 3D-друку будинків і виявити ключові фактори, які впливають на його ефективність, доцільність та масштабованість в українських умовах.

Огляд літератури та аналіз сучасного стану 3D-друку в будівництві

2.1 Історія розвитку 3D-друку в архітектурі та будівництві

3D-друк як технологія виник у середині 1980-х років у промисловому виробництві, коли Чак Халл створив перший пристрій стереолітографії (SLA). З того часу технологія розвивалася як інструмент для створення прототипів у машинобудуванні, медицині, дизайні. Проте її потенціал значно вийшов за межі малих моделей — і вже у 2000-х роках інженери почали експериментувати з ідеєю застосування 3D-друку для будівельних конструкцій.

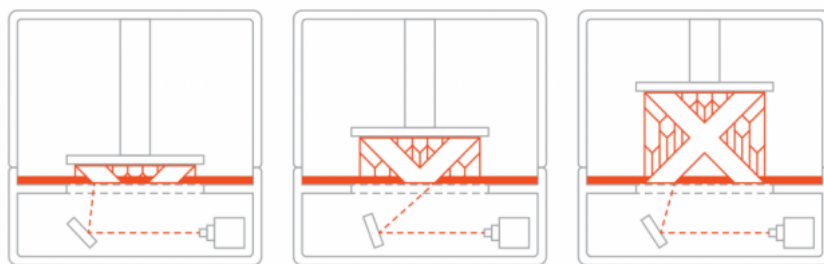


Рисунок 6 – Процес друку за технологією SLA

Перші серйозні спроби використання адитивного виробництва у сфері будівництва з'явилися на початку 2010-х років. Зокрема, компанія Contour Crafting, заснована професором Беханом Кодсеві у США, стала піонером і запропонувала систему автоматизованого друку стін будівель без участі робітників. Це поклало початок розвитку нової галузі — адитивного будівництва.

Таблиця 3 — Історія розвитку 3D-друку в архітектурі та будівництві

Рік /	Подія / Досягнення	Опис / Значення
-------	--------------------	-----------------

Період		
1980-ті	Поява перших технологій 3D-друку (стереолітографія)	Винахід перших методів адитивного виробництва, що стали базою для майбутнього застосування у будівництві.
1990-ті	Експериментальні дослідження 3D-друку бетонних конструкцій	Проведення перших спроб друку великих елементів з бетону, переважно в лабораторних умовах.
2000-ті	Розвиток комерційних 3D-принтерів для будівництва	Вихід на ринок перших будівельних 3D-принтерів, збільшення масштабів друку.
2010-ті	Поява перших житлових будинків, надрукованих 3D-принтером	Реалізація перших житлових проектів, що підтвердили практичну застосовність технології.
2015	Перший надрукований 3D-друком будинок у Нідерландах	Важлива віхова подія, яка привернула увагу світової спільноти до технології.
2018	Активний розвиток технології в Китаї та США	Масштабні проекти та інвестиції у 3D-друк житлових і промислових будівель.
2020-ті	Застосування 3D-друку в Україні та інших країнах Східної Європи	Початок адаптації технології до локальних умов, розробка національних стандартів.
Сучасність	Інтеграція 3D-друку з іншими цифровими технологіями (BIM, IoT)	Підвищення ефективності проектування та будівництва, оптимізація процесів.

З 2013 року технології почали активно випробовуватись у різних країнах:

- У Китаї компанія WinSun заявила про друк 10 будинків за один день із використанням рециклованих матеріалів.

- У Нідерландах було реалізовано перший житловий об'єкт із бетону, надрукований за допомогою принтера у формі модуля — "Project Milestone" (2021 рік).
- У Дубаї реалізовано державну програму з метою перевести 25% будівництва на 3D-друк до 2030 року. Один із перших великих об'єктів — Офіс майбутнього (2016), створений за добу.

У США компанії ICON, SQ4D та інші активно працюють над будівництвом соціального житла із застосуванням бетонних 3D-принтерів. Деякі з їхніх проєктів вже сертифіковано для постійного проживання.



Рисунок 7 — Перший дім надрукований 3-д принтером у Франції

Спершу технологія вважалась експериментальною, однак із роками вона перетворилась на потужний інструмент з потенціалом повної автоматизації будівництва. Зараз 3D-друк у цій сфері — це не лише технологічна інновація, а й потенційний ключ до вирішення глобальних проблем з доступністю житла.



Рисунок 8 — Перший будинок надруваний на 3д принтері у США

Особливістю розвитку є різноманітність підходів: деякі компанії друкують стіни повністю, інші — великі елементи, які потім збираються як конструктор. Матеріали також відрізняються: бетонні суміші, полімери з домішками ґрунту, геополімери та навіть глиняні маси.

Для України це новий, але перспективний напрям. У 2023–2024 роках було заявлено про кілька перших ініціатив з будівництва житла методом 3D-друку, особливо в рамках відбудови зруйнованої інфраструктури. Однак відсутність нормативної бази, підготовлених кадрів та локалізованої техніки поки що стримує широке впровадження.



Рисунок 9 — Один із перших будинків в Україні надрукований 3д принтером який повністю автономний

2.2 Основні технології 3D-друку, що застосовуються у будівництві

3D-друк у будівництві охоплює кілька різних технологічних підходів, які ґрунтуються на загальному принципі — адитивного виготовлення, тобто створення об'єктів шляхом нанесення матеріалу шарами згідно з цифровою моделлю. Однак реалізація цього процесу у масштабах будівництва має суттєві відмінності від традиційного 3D-друку в машинобудуванні чи дизайні. Нижче розглянуто основні технології, що вже застосовуються або активно розробляються у світі.

1. Екструзійний 3D-друк (Concrete Extrusion / Contour Crafting)

Це найпоширеніша технологія у будівництві, де спеціальний будівельний принтер "видає" будівельну суміш (зазвичай бетон або геополімер) по заздалегідь визначеній траєкторії.

Особливості:

- Принтер подає суміш через сопло, яке рухається по тривимірній координатній системі.
- Друк виконується шарами: спочатку формується контур стіни, потім заповнюється внутрішній простір.
- У деяких випадках суміш армована фіброю або армуючими вставками, які закладаються вручну або автоматизовано.

Переваги:

- Висока швидкість зведення стін.
- Можливість друкувати криволінійні форми без опалубки.
- Мінімізація будівельних відходів.

Недоліки:

- Обмежена висота друку за одну операцію (зазвичай 2,5–3 м).
- Потрібна спеціальна рецептура суміші з точно визначеною в'язкістю та часом тужавіння.
- Обмежені можливості інтеграції комунікацій під час друку.

Застосування:

- Компанії: *ICON (США)*, *COBOD (Данія)*, *Apis Cor (США/ОАЕ)*, *Winsun (Китай)*.
- Приклади: житлові будинки, модульні споруди, укриття, офіси.

2. Сегментний 3D-друк (Prefabricated Segments Printing)

У цьому підході елементи будівлі друкуються окремо (наприклад, стіни, перекриття, арки) у заводських умовах, а потім транспортуються на будмайданчик для збирання.

Особливості:

- Використовуються великогабаритні принтери на виробництві.
- Друкуються цілісні або порожнисті блоки, які мають з'єднувальні елементи.
- Після транспортування елементи монтуються як конструктор.

Переваги:

- Висока точність виготовлення.
- Можливість виготовлення у контрольованих умовах (не залежить від погоди).
- Зменшення часу на будмайданчику.

Недоліки:

- Вартість логістики готових елементів.
- Складність стикування при складних формах.
- Необхідність підйомної техніки.

Застосування:

- Часто використовується в Європі для друкування фасадних елементів і в мостобудуванні.
- Наприклад, *Project Milestone (Нідерланди)*.



Рисунок 10 — *приклад друкованого сегмента будинку*

3. Роботизований 3D-друк (Robotic Arm Printing)

У цій системі замість порталного принтера використовується роботизована рука, подібна до промислових маніпуляторів.

Особливості:

- Робот має більшу гнучкість рухів, ніж каркасний принтер.
- Може друкувати з різних кутів, навіть під нахилом.
- Часто використовується для друку дрібних, складних елементів (меблів, інтер'єру, криволінійних фасадів).

Переваги:

- Надвисока точність.
- Можливість створення складних форм, які важко реалізувати вручну.
- Може інтегрувати кілька функцій — друк, фрезерування, шліфування.

Недоліки:

- Обмежена зона друку (в межах досяжності руки).
- Висока вартість обладнання.
- Не завжди придатний для повноформатного друку стін.

Застосування:

- Друк меблів, нестандартних інтер'єрів, складних фасадів.

Наприклад: *ETH Zurich, IAAC (Барселона)*.



Рисунок 11 — Роботизований маніпулятор за 3D-друком архітектурного елемента

Таблиця 4 — Основні технології 3D-друку, що застосовуються у будівництві

Технологія 3D-друку	Опис	Переваги	Недоліки / Обмеження
Екструзійний (шаруватий) друк	Видавлювання бетонної або цементної суміші шар за шаром через сопло.	Відносна простота, швидкість друку, можливість друку великих елементів.	Обмежена точність, складність друку складних форм.
Стереолітографія (SLA)	Використання світлової полімеризації рідких смол для формування об'єктів.	Висока точність, гладка поверхня.	Обмежена міцність матеріалів, малий розмір об'єктів.
Лазерне спікання (SLS)	Спікання порошкових матеріалів (наприклад, цементу або полімерів)	Висока деталізація, можливість друку складних форм.	Високі енергетичні витрати,

	лазером.		дорожнє обладнання.
Binder Jetting	Нанесення зв'язуючого розчину на шар порошку матеріалу (наприклад, піску з цементом).	Можливість швидкого друку великих об'ємів, хороша структурна міцність.	Потребує подальшої обробки, обмежена міцність на початкових етапах.
3D-друк з використанням армування	Включення армувальних елементів (волокон, сіток) під час друку для підвищення міцності конструкції.	Підвищена міцність і довговічність конструкцій.	Складність технології, збільшення часу друку.

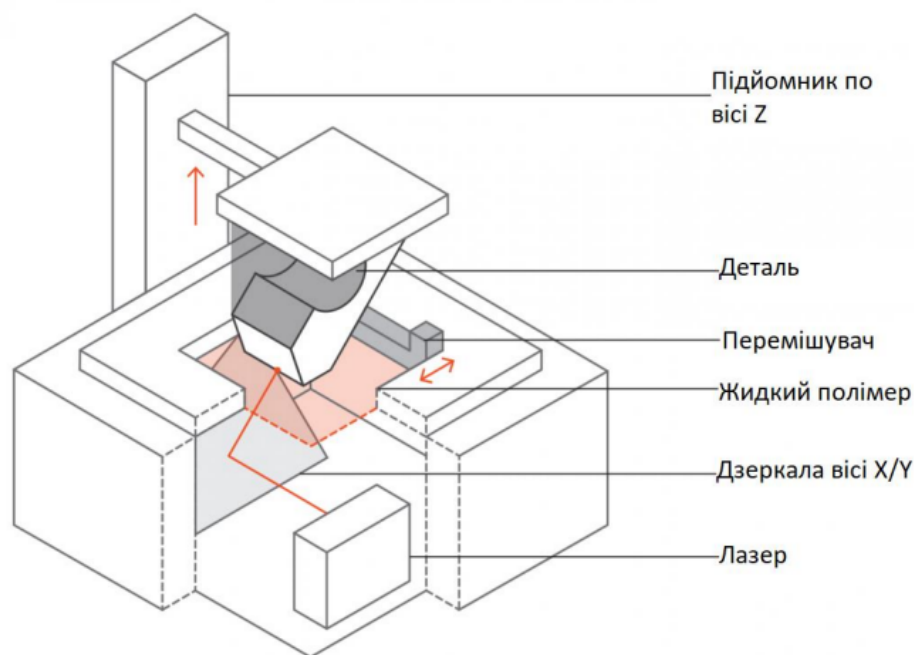


Рисунок 12 – Схема роботи SLA принтера

4. Порошковий друк (Powder-Based Printing)

Менш розповсюджений підхід, який ґрунтується на принципі нанесення шару порошку (піску, цементу) і селективного зв'язування частин за допомогою спеціального клею або реагента.

Особливості:

- Дозволяє створювати деталі без додаткової опалубки.
- Забезпечує дуже складну геометрію (в тому числі порожнини, арки).
- Технологія частіше застосовується у виготовленні декоративних або функціональних елементів.

Переваги:

- Повна свобода форм.
- Можна друкувати конструкції з пустотами, отворами, арками без підтримки.

Недоліки:

- Повільніша технологія.
- Висока вартість матеріалу.
- Мала міцність без постобробки.

Застосування:

- Архітектурні панелі, малі архітектурні форми.

Наприклад: експериментальні проєкти MIT, *Emerging Objects* (США).

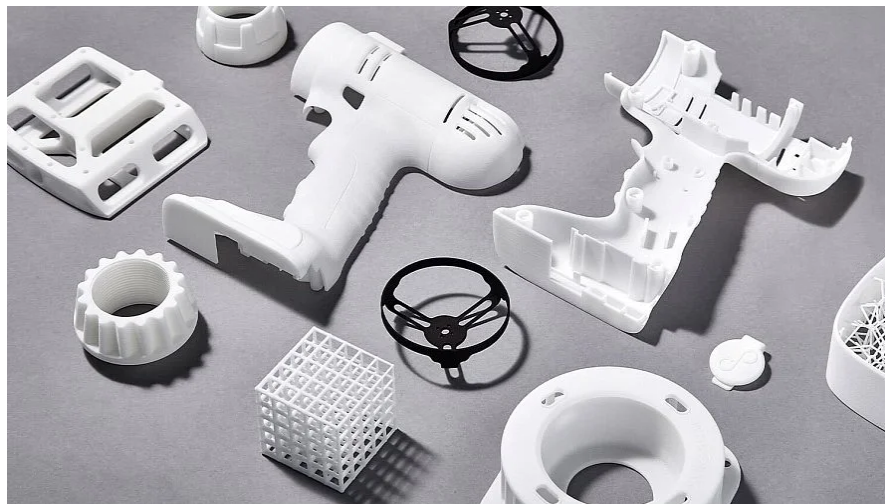


Рисунок 13 — Приклад друку піщаних конструкцій методом селективного зв'язування

5. Гібридні технології

Деякі компанії поєднують друк і монтаж: наприклад, друкують каркас, а потім вручну додають інженерію, утеплення, оздоблення. Також використовуються проміжні технології, де зовнішні стіни друкуються, а внутрішні — встановлюються із готових модулів.

Висновок до підрозділу

На сьогодні екструзійний 3D-друк є найпопулярнішим у сфері будівництва, але розвиток інших технологій дозволяє розширювати можливості цієї галузі. Вибір конкретної технології залежить від завдань, бюджету, бажаної форми будівлі, кліматичних умов та наявності матеріалів.

З часом, імовірно, відбудеться уніфікація та оптимізація, що зробить 3D-друк у будівництві масовим, а сам процес — дешевшим і більш доступним.

2.3 Переваги та недоліки 3D-друку у порівнянні з традиційними методами

3D-друк у будівництві на сьогодні є інноваційним підходом, який активно розвивається та викликає все більший інтерес як у наукових колах, так і серед практиків. У порівнянні з традиційними методами зведення будівель, адитивні технології мають низку суттєвих переваг, хоча водночас стикаються із рядом об'єктивних обмежень та викликів.

Однією з ключових переваг 3D-друку є суттєве скорочення часу будівництва. Завдяки автоматизації процесу та відсутності потреби у виготовленні опалубки, будівельні роботи можна виконати в кілька разів швидше, ніж при звичних підходах. Деякі компанії демонструють можливість зведення невеликих житлових будинків усього за 24–48 годин. Така швидкість особливо актуальна при будівництві тимчасового або соціального житла, а також під час надзвичайних ситуацій — після стихійних лих або воєнних дій.

Ще одна важлива перевага — зниження витрат на матеріали. Технологія дозволяє точно дозувати суміш, формувати внутрішні порожнини в стінах, уникати зайвих обрізків та мінімізувати відходи.

За оцінками різних дослідників, економія матеріалу у порівнянні з традиційними методами може сягати 30–60%. Крім того, деякі технології дозволяють використовувати перероблені або місцеві ресурси (наприклад, пісок, глину чи промислові відходи).

Також 3D-друк відкриває нові архітектурні можливості — створення криволінійних форм, органічних конструкцій, нетипових фасадів, які раніше вимагали великої ручної праці або були взагалі технічно неможливими. Таким чином, архітектори отримують більше свободи в дизайні, а клієнти — унікальні рішення замість стандартних «типових» коробок.

Серед інших переваг — зменшення потреби у робочій силі, особливо важливо в умовах нестачі кваліфікованих працівників. Один оператор може керувати будівельним принтером, а решта процесів автоматизуються або механізуються. Це суттєво знижує людський фактор, ризики травматизму, витрати на оплату праці.

Однак 3D-друк у будівництві має і низку серйозних недоліків, які поки стримують його масове впровадження. Насамперед — це висока вартість обладнання. Будівельні принтери, особливо великоформатні або роботизовані, є дорогими у закупівлі та обслуговуванні. Крім того, до них потрібне спеціальне ПЗ, обслуговування, навчений персонал.

Ще один виклик — відсутність нормативної бази у багатьох країнах, зокрема в Україні. Проектування та здача в експлуатацію будівель, зведених за допомогою 3D-друку, часто не вкладаються в рамки існуючих стандартів. Це ускладнює їх легалізацію, страхування, продаж чи передачу у власність.

Технологія також має фізичні обмеження — зокрема, висоту об'єкта, який можна надрукувати, а також складнощі з інтеграцією інженерних мереж (водопровід, електрика) без додаткових робіт. У більшості випадків поки друкуються лише несучі чи огорожувальні конструкції, тоді як дах, підлога, інтер'єр та комунікації монтуються традиційно.

Таблиця 5 — Переваги та недоліки 3D-друку у порівнянні з традиційними методами

Аспект	Переваги 3D-друку	Недоліки 3D-друку	Порівняння з традиційними методами
Швидкість будівництва	Значно скорочує час зведення конструкцій за рахунок автоматизації процесу та безперервного друку.	Необхідність часу на підготовку моделей і налаштування обладнання.	Традиційне будівництво зазвичай довше через більшу кількість ручної роботи і етапів.
Вартість	Зниження витрат на робочу силу, оптимізація використання матеріалів, менше відходів.	Висока вартість спеціалізованого обладнання, обмежена доступність технології.	Традиційні методи мають більші витрати на матеріали та оплату праці, але дешевше обладнання.
Точність і деталізація	Можливість створення складних форм та деталей, важко або неможливо реалізувати традиційними способами.	Технічні обмеження в розмірах та складності деяких конструкцій.	Традиційні методи менш точні, особливо для складних архітектурних форм.
Матеріали	Використання спеціалізованих сумішей та композитів, можливість інтеграції армування під час друку.	Обмежений вибір матеріалів у порівнянні з традиційним будівництвом.	Традиційне будівництво використовує широкий спектр матеріалів з перевіреними властивостями.
Екологічність	Зменшення відходів, можливість використання екологічно чистих матеріалів, зниження вуглецевого сліду.	Енергоспоживання обладнання, потреба у спеціальних матеріалах.	Традиційне будівництво має більший вплив на навколишнє середовище через використання ресурсів.

Гнучкість у дизайні	Легкість внесення змін у цифрову модель, швидке адаптування до нових проектів без додаткових затрат.	Потребує високої кваліфікації спеціалістів, складність адаптації для масового виробництва.	Традиційне будівництво менш гнучке у швидких змінах дизайну через фізичні обмеження.
Безпека праці	Мінімізація участі людини у важких та небезпечних процесах, зниження ризиків травматизму.	Необхідність контролю і обслуговування складного обладнання.	Традиційне будівництво пов'язане з більш високим рівнем ризиків для працівників.

Також значну роль відіграє залежність від погодних умов (у випадку друку на відкритому майданчику) — дощ, мороз чи сильна спека можуть зупинити процес. А суміші, що використовуються, повинні мати чітко контрольовані властивості: рухливість, тужавіння, міцність.

Таким чином, незважаючи на численні переваги — швидкість, економічність, гнучкість у формоутворенні — 3D-друк поки не є універсальною заміною традиційного будівництва. Його ефективність залежить від конкретних умов, цілей проєкту, технічних і фінансових можливостей. Проте вже зараз очевидно, цей напрям має величезний потенціал і в майбутньому може докорінно змінити уявлення про процес створення житлових і громадських споруд.

2.4 Приклади реалізованих об'єктів: світовий та український досвід

3D-друк у будівництві вже перейшов від стадії експериментів до практичної реалізації десятків проєктів у різних країнах світу. Переважна більшість із них має демонстраційний або пілотний характер, однак є й повноцінні житлові та комерційні будівлі успішно функціонують. Нижче наведено огляд найбільш відомих

реалізованих об'єктів, які демонструють потенціал та напрямки розвитку цієї технології.

Світовий досвід

1. ICON (США)

Одна з найвідоміших компаній, що спеціалізується на будівельному 3D-друці. У співпраці з неурядовими організаціями вона реалізувала проекти з будівництва масового доступного житла в Мексиці, а також першого в США друківаного району з понад 100 будинків у Техасі.

Будинки друкуються з використанням спеціальної бетонної суміші Lavacrete. Кожен дім має сучасний дизайн, витримує урагани та землетруси, а процес будівництва займає всього кілька днів.



Рисунок 14 — друк будинку від ICON у США

2. COBOD (Данія)

Данська компанія COBOD спеціалізується на виготовленні будівельних принтерів. Вона постачає обладнання до десятків країн, зокрема в Європу, США, ОАЕ та Індію. Один із найвідоміших проектів — офісна будівля у Дубаї, яка на момент завершення вважалася найбільшою у світі друківаною спорудою.

COBOD також активно співпрацює з великими будівельними корпораціями, такими як PERI (Німеччина), що створює перші друківані будинки в Європі, зокрема в Німеччині, Бельгії, Угорщині.

3. Apis Cor (США/ОАЕ)

Ця компанія створила один з перших повноцінно надрукованих житлових будинків у Москві ще у 2017 році. Надалі Apis Cor реалізувала проєкти з друку адміністративних будівель у США, а також працює над рішеннями для Місяця та Марса у партнерстві з NASA.

Особливістю принтера Apis Cor є його компактність і мобільність — він може бути легко перевезений з одного майданчика на інший.

4. Winsun (Китай)

Winsun стала першою компанією, яка ще у 2014 році надрукувала 10 житлових будинків за один день, використовуючи промислові 3D-принтери та будівельні відходи як основну сировину. Пізніше компанія створила друкований офіс, віллу та навіть будівельні компоненти для мостів.

Цей підхід дозволив знизити витрати на матеріали та продемонструвати можливість масштабного виробництва.

5. Project Milestone (Нідерланди)

Проект реалізовано у місті Ейндговен — серія з п'яти житлових друкованих будинків, кожен з яких має унікальну органічну форму. Перший дім уже заселено, він повністю відповідає нормам енергоефективності та безпеки.

Український досвід

У контексті повномасштабної війни та руйнувань, спричинених агресією РФ, питання швидкого та економічного відновлення житла стало в Україні надзвичайно актуальним. Саме тому у 2023–2024 роках відбулися перші кроки до впровадження будівельного 3D-друку на території України.

1. Пасивний будинок у Львівській області (2023)

Команда українських інженерів та архітекторів за підтримки іноземних партнерів (зокрема COBOD) реалізувала пілотний проєкт друку житлового будинку у Львівській області. Об'єкт було зведено за кілька днів, із використанням місцевих будівельних матеріалів та адаптованих технологій.

Проєкт мав на меті не лише перевірити життєздатність технології в українських умовах, а й оцінити енергоефективність споруди.

2. 3D-друковані укриття для фронту (ініціативи 2023–2024)

Волонтери та стартапи, такі як "3D Print Ukraine", працювали над створенням модулів для тимчасового житла або укриттів для військових. Ідея полягала у швидкому виготовленні мобільних конструкцій у тилкових районах та транспортуванні їх до місць призначення.

Ці проєкти ще не стали масовими, але вказують на великий потенціал 3D-друку в оборонній та гуманітарній сфері.

3. Освітні ініціативи та дослідницькі розробки

Університети, зокрема Київський національний університет будівництва і архітектури (КНУБА), проводять наукові дослідження з адитивних технологій у будівництві. Ведуться роботи зі створення українських рецептур бетонів для 3D-друку, розробляються вітчизняні конструкції принтерів.

Таблиця 6 — Приклади реалізованих об'єктів: світовий та український досвід

Проєкт	Рік реалізації	Опис	Технологія друку	Особливості/Досягнення
Перший 3D-друкований будинок	2015	Маленький житловий будинок, надрукований	Екструзійний 3D-друк	Перший житловий будинок, що отримав дозвіл

		бетонним екструзійним 3D-принтером		на проживання
Project Milestone	2018	Надрукований житловий комплекс із кількох будинків, прискорене будівництво	Екструзія бетону	Масштабний проєкт який демонструє серійне будівництво
3D-друк будинку в Херсоні	2021	Перший житловий будинок, надрукований в Україні	Екструзійний бетонний друк	Вітчизняна адаптація технології з урахуванням клімату
WinSun 3D-друковані будинки	2014-2020	Будівництво житлових та комерційних будівель із бетонних сумішей	Екструзія бетону	Масштабне виробництво, тисячі квадратних метрів за короткий час
The 3D Housing Project	2020	Експериментальний проєкт друку житлових блоків з екологічних матеріалів	Екструзійний 3D-друк	Застосування перероблених матеріалів, енергоефективність

Успішні приклади реалізованих об'єктів у США, Європі, Китаї та навіть в Україні доводять: 3D-друк має практичну цінність та готовий до ширшого впровадження. Кожен проєкт демонструє різні підходи — від друку цілих будинків на місці до попереднього виготовлення сегментів у контрольованих умовах. Український досвід поки перебуває на ранньому етапі, однак наявність вже реалізованих пілотних об'єктів та зростаючий інтерес до теми свідчать про добрі перспективи розвитку цієї галузі в найближчі роки.

Технологічні особливості застосування 3D-друку у будівництві

3.1 Принцип роботи будівельного 3D-принтера

Будівельний 3D-принтер — це спеціалізоване обладнання, призначене для автоматизованого зведення будівель шляхом послідовного накладання шарів будівельного матеріалу відповідно до заданої цифрової моделі. На відміну від побутових або промислових 3D-принтерів, які друкують пластиком або металом, будівельні використовують бетоноподібні суміші, що мають відповідні властивості для забезпечення міцності, швидкого тужавіння та стабільності конструкції.

Принцип роботи будівельного принтера базується на адитивній технології, тобто побудові об'єкта шляхом додавання матеріалу шар за шаром. В основі всього процесу лежить цифрова модель будівлі, яка розробляється в CAD-програмі (наприклад, Revit, AutoCAD, Rhino, SketchUp) і перетворюється у формат, придатний для друку (часто — G-коди).

Таблиця 7 — Принцип роботи будівельного 3D-принтера

Етап / Компонент	Опис	Функції / Призначення
Підготовка цифрової моделі	Створення тривимірної CAD-моделі будівельної конструкції з урахуванням технічних вимог	Формування детального плану для друку, перевірка геометрії
Система подачі матеріалу	Механізм подачі бетонної суміші або іншого будівельного матеріалу до сопла друку	Забезпечення безперервного та рівномірного подавання матеріалу
Сопло (екструдер)	Вихідний отвір, через який видавлюється	Формування шару конструкції по шарах

	шар матеріалу у заданому напрямку	згідно з моделлю
Система позиціонування	Робочий механізм (рельсовий, роботизований маніпулятор) переміщує сопло у просторі	Забезпечення точного руху сопла по осях X, Y, Z
Контроль якості друку	Датчики і камери для моніторингу процесу, фіксації можливих дефектів	Автоматичне регулювання параметрів друку, попередження помилок
Підтримка шару	Використання матеріалів або технологій для стабілізації надрукованого шару до затвердіння	Забезпечення міцності та точності форми, запобігання деформаціям
Сушка та затвердіння	Фізико-хімічні процеси, що відбуваються після нанесення шару, забезпечують твердіння матеріалу	Перетворення надрукованого шару у міцний елемент конструкції

Далі відбуваються такі етапи:

1. Підготовка цифрової моделі.

Архітектор або інженер розробляє 3D-модель майбутньої споруди, враховуючи товщину стін, отвори, кути та особливості матеріалу. Ця модель потім «нарізається» на окремі шари програмним забезпеченням принтера.

2. Завантаження матеріалу.

До системи подається спеціальна цементна або полімерно-бетонна суміш. Її консистенція повинна бути ідеально підібрана: достатньо

густа, щоб не розтікатися після викладання, але достатньо рідка легко виходити з екструдера.

3. Процес друку.

Принтер починає друк з нижнього шару, переміщаючи екструдер по тривимірній координатній системі (X, Y, Z). Зазвичай використовується портальний механізм або роботизований маніпулятор. Суміш видавлюється через спеціальне сопло, формуючи суцільний шар майбутньої конструкції. Принтер повторює цю дію шар за шаром, формуючи стіни згідно із заданими параметрами.

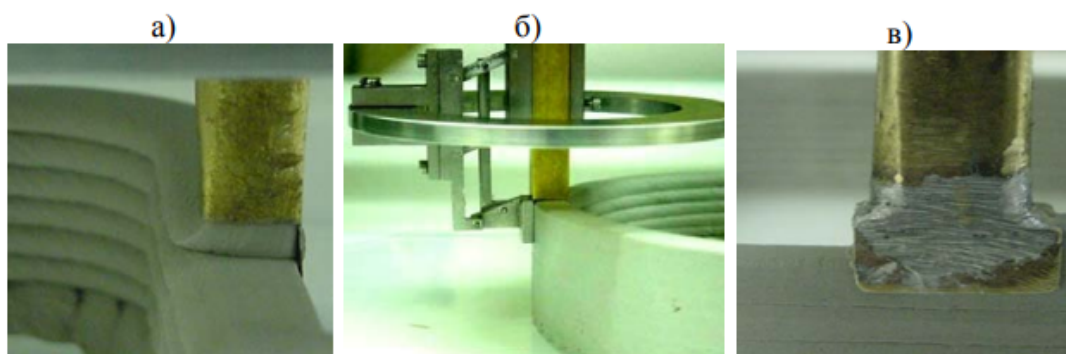


Рисунок 15 — Процес друкування об'єкта

а, в – переміщення екструдера; б – головка принтера

4. Контроль процесу.

В процесі друку використовуються датчики, камери та програмне забезпечення які контролюють точність, стабільність та параметри друку — товщину шару, витрати матеріалу, швидкість переміщення тощо.

5. Технічна пауза для застигання.

Після завершення певної кількості шарів можливе коротке припинення друку для часткового тужавіння суміші — це забезпечує стабільність конструкції і дозволяє уникнути деформацій.

6. Завершення друку та додаткові роботи.

Після завершення друку конструкції додаються елементи даху, дверей, вікон, внутрішнього оздоблення та інженерних систем. У деяких випадках, як альтернатива, використовуються модульні інженерні вставки, які інтегруються в процесі друку або після нього.

Будівельні 3D-принтери можуть мати різну конфігурацію:

- Портальні принтери — встановлюються навколо будівельного майданчика (схожі на каркасний міст), по якому рухається голова екструдера.
- Роботизовані маніпулятори — більше підходять для друку складних форм на невеликих площах.
- Мобільні принтери на колесах або рейках — можуть переміщуватись по ділянці, що зручно для великих об'єктів або друку поетапно.

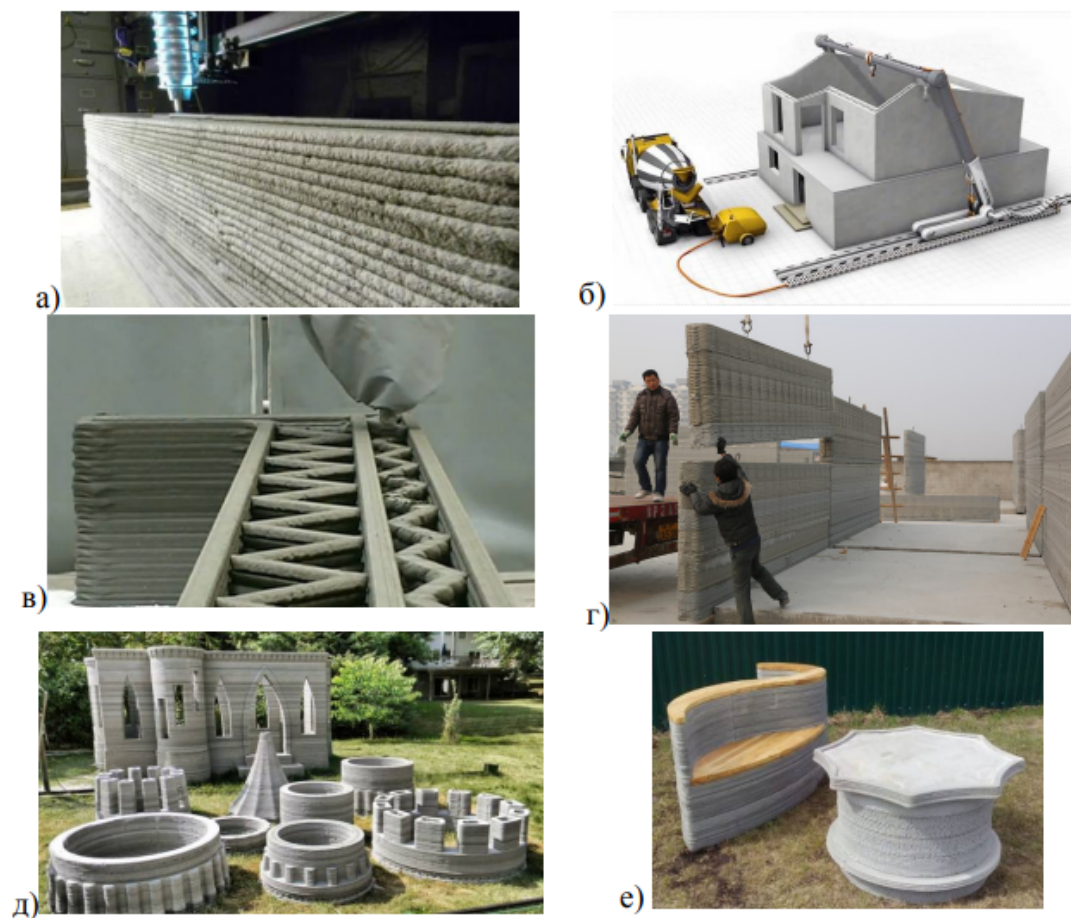


Рисунок 16 — Сценарії 3D-друку: повна будівля, елементи, макети, складання на майданчику

а), б) – зведення будівлі; в) – друкування конструкцій; г) – монтаж друкованих будівельних конструкцій; д) – макети будівель; е) – елементи ландшафтного дизайну

До ключових параметрів, які визначають ефективність друку, належать:

- ширина та висота шару;
- швидкість подачі матеріалу;
- точність позиціонування;
- швидкість друку;
- тип та властивості суміші.

Сучасні принтери також можуть бути оснащені функціями автоматичного вирівнювання, температурного контролю, а іноді й двома екструдерами — наприклад, для одночасного друку структурного і теплоізоляційного шару.



Рисунок 17 — Процес друку стіни

3.2 Матеріали, що використовуються для друку конструкцій

Якість, довговічність та безпечність надрукованих будівель значною мірою залежать від матеріалу, котрі використовується у процесі 3D-друку. Основною особливістю будівельних сумішей для адитивного виробництва є їх здатність швидко тужавіти, зберігаючи при цьому пластичність під час видавлювання, а також забезпечення високої міцності після затвердіння.

Найбільш поширеним матеріалом для будівельного 3D-друку є спеціальний бетон (бетонні суміші), однак також використовуються полімери, геополімери, глини, вапнякові розчини, а іноді навіть будівельні відходи.

1. Цементобетонні суміші

Це найпоширеніший тип матеріалу для будівельного 3D-друку. Вони складаються з:

- цементу (зазвичай портландцементу),
- мінеральних наповнювачів (кварцовий пісок, мікрокальцит),
- води або пластифікаторів,
- добавок для регулювання тужавіння, зчеплення, міцності (наприклад, суперпластифікатори, прискорювачі тужавіння, мікрОВОлокна).

Головна мета — досягти оптимального балансу між текучістю та стабільністю шару. Суміш повинна легко виходити з сопла, зберігати форму після накладання та забезпечувати хорошу адгезію з попереднім шаром.

Приклад:

Суміш Lavacrete, що використовується компанією ICON (США), має запатентований склад і здатна витримувати сейсмічні навантаження.



Рисунок 18 — Надрукований бетон

2. Геополімери та альтернативні цементні матеріали

Геополімерні суміші — це екологічні матеріали вони не містять традиційного цементу. Вони виготовляються з:

- метакіоліну, золи-виносу, доменних шлаків,
- лужних активаторів (гідроксид натрію, силікати),
- води та стабілізуючих добавок.

Переваги геополімерів — низький вуглецевий слід, висока хімічна стійкість, можливість використання відходів промисловості. Проте їх властивості можуть бути нестабільними в різних кліматичних умовах.

Застосування:

Використовуються переважно у дослідницьких проєктах або екологічних ініціативах.

3. Глиняні та ґрунтові суміші

Глина є традиційним будівельним матеріалом, а в контексті 3D-друку — потенційно дешевою та доступною сировиною. Такі суміші зазвичай включають:

- глину або мул,
- соломі чи армувальні волокна (натуральні або штучні),
- воду.

Ці матеріали придатні для екологічного та дешевого житла, особливо у регіонах з помірним кліматом. Але вони не мають високої вологостійкості, що обмежує їх застосування.

Приклади:

Експериментальні глиняні будівлі в Італії (проєкт TECLA) та Африці.



Рисунок 19 — Експериментальні глиняні будинки в Італії

4. Полімери та композити

Полімерні матеріали (переважно термопластики або їх суміші з піском/волокнами) використовуються рідко в основних несучих

конструкціях, але активно застосовуються для створення внутрішніх елементів, ізоляції або фасадних компонентів.

Переваги — гнучкість, мала вага, можливість створення складних форм. Недоліки — низька несуча здатність, вартість, низька екологічність.

Вимоги до матеріалів для будівельного 3D-друку

Усі суміші, що використовуються для будівельного друку, повинні відповідати ряду технічних вимог:

- Тиксотропність — здатність густішати після видавлювання, утримуючи форму.
- Стабільна реологія — стійкість до розшарування, збереження консистенції.
- Швидке початкове тужавіння — щоб кожен шар міг витримати наступні.
- Адгезія між шарами — для формування монолітної структури.
- Сумісність з армуванням — при використанні армувальних ниток або сітки.

Таблиця 8 — Матеріали, що використовуються для друку конструкцій

Матеріал	Опис	Основні характеристики	Переваги	Обмеження
Бетонні суміші (спеціалізовані)	Модифікований бетон з добавками для покращення плинності та швидкості твердіння	Висока міцність, швидке затвердіння, пластичність	Відносно низька вартість, добра адгезія, міцність	Необхідність контролю якості, ризик тріщин
Полімерні композити	Пластики з наповнювача	Легкість, гнучкість	Швидкий друк, можливість	Обмежена міцність для

	ми (волокна, порошки), використовуються для легких конструкцій	ь, стійкість до корозії	створення складних форм	несучих елементів
Армовані бетонні суміші	Бетон з додаванням армувальних волокон (скловолокно, вуглецеве волокно)	Підвищення міцності на розтягнення і згин	Збільшення довговічності конструкцій	Вища вартість, складність при подачі суміші
Глина та земля	Природні матеріали з домішками для покращення пластичності та міцності	Екологічність, природність, теплоізоляція	Доступність, екологічність, регулювання мікроклімату	Менша міцність, обмежене застосування
Металеві порошки	Порошки алюмінію, сталі, титану, що використовуються у лазерному спіканні	Висока міцність, стійкість до навантажень	Висока точність, довговічність	Дуже висока вартість, складність технології
Біополімери та біокомпозити	Матеріали на основі відновлюваних ресурсів, іноді з додаванням природних волокон	Біорозкладність, низька токсичність	Екологічність, легкість, можливість переробки	Обмежена міцність, обмежена стійкість до зовнішніх впливів

Матеріали для 3D-друку в будівництві є ключовим фактором успіху технології. Їх вибір залежить від цілей проєкту, кліматичних умов, бюджетних обмежень та архітектурних рішень. У перспективі очікується поява ще більш адаптованих, екологічних і функціональних матеріалів, які дозволять значно розширити застосування 3D-друку у світовій і, зокрема, українській будівельній практиці.

3.3 Загальні вимоги до конструкцій, виготовлених методом 3D-друку

Конструкції, виготовлені методом 3D-друку, повинні відповідати тим самим базовим вимогам, що й традиційні будівельні споруди. Проте через специфіку технології, до таких конструкцій також висувуються особливі технічні, нормативні та експлуатаційні вимоги, враховують особливості шарової структури, властивості матеріалів та обмеження технологічного процесу.

Нижче я розглянув ключові вимоги, яких необхідно дотримуватись під час проектування і реалізації 3D-друкованих будівель.

Таблиця 9 — Загальні вимоги до 3D-друкованих конструкцій

Вимога	Опис	Критерії/П оказники	Методи контролю
Механічна міцність	Витримування навантажень без руйнування або деформацій	Межа міцності на стиск, розтяг, згинання, ударостійкість	Лабораторні випробування, моделювання, контроль під час друку
Геометрична точність	Відповідність розмірів і форми цифровій моделі	Допуски по лінійних розмірах, точність позиціонування	3D-сканування, візуальний контроль, цифровий аналіз
Адгезія між шарами	Якісне з'єднання шарів без дефектів	Відсутність розшарувань, мінімальна	Мікроскопічний аналіз, ультразвуковий

		пористість	контроль
Стійкість до зовнішніх впливів	Стійкість до вологи, УФ-випромінювання, хімічних речовин, температурних перепадів	Відсутність корозії, деформацій, втрати міцності	Кліматичні камери, хімічні випробування
Тепло- і звукоізоляція	Здатність утримувати тепло і знижувати рівень шуму	Коефіцієнти теплопровідності та звукоізоляції	Лабораторні вимірювання, симуляції
Екологічність матеріалів	Відсутність токсичних речовин, можливість переробки	Сертифікації, стандарти екологічності	Сертифікація, екологічний аудит

1. Міцність і стабільність конструкції

Основна вимога до будь-якої будівлі — забезпечення несучої здатності, яка гарантує безпечну експлуатацію. Для конструкцій, надрукованих за допомогою 3D-принтера, необхідно враховувати:

- міцність матеріалу (на стиск, розтяг, зсув);
- адгезію між шарами, часто є слабким місцем у 3D-друкованих конструкціях;
- розподіл навантажень — особливо у зонах відкосів, отворів, з'єднань.

Для забезпечення міцності часто застосовуються армувальні вставки (металеві або композитні стрижні, сітка), які інтегруються у процесі друку.

2. Геометрична точність

У 3D-друку дуже важливо дотримуватися високої точності позиціонування екструдера, оскільки кожне відхилення може накопичуватись і призвести до деформацій будівлі. Основні критерії точності:

- допуск на товщину шару — зазвичай не більше $\pm 1\text{--}2$ мм;
- правильність вертикальних і горизонтальних площин;
- збереження заданої форми віконних та дверних отворів.

Сучасні принтери оснащуються сенсорами, що автоматично коригують похибки, а також здійснюють контроль за станом поверхні.

3. Морозостійкість і вологостійкість

Оскільки значна частина друку здійснюється на відкритому повітрі або у вологих умовах, матеріали та конструкції мають бути стійкими до:

- циклів замерзання/відтавання;
- дії опадів;
- утворення тріщин від внутрішньої вологи.

Для цього в бетон додають гідрофобізатори, мікрОВОлокна та інші добавки, які зменшують пористість і збільшують стійкість до вологи.

4. Теплоізоляція та енергоефективність

Оскільки надруковані стіни зазвичай не є багатошаровими, виникає питання про забезпечення належного теплового захисту. Це вирішується такими способами:

- друк стін із внутрішніми повітряними порожнинами;
- використання комбінованих матеріалів (наприклад, друк зовнішнього шару з міцного бетону, а внутрішнього — з теплоізоляційного);

додаткова теплоізоляція після друку (пінополіуретан, мінеральна вата тощо).

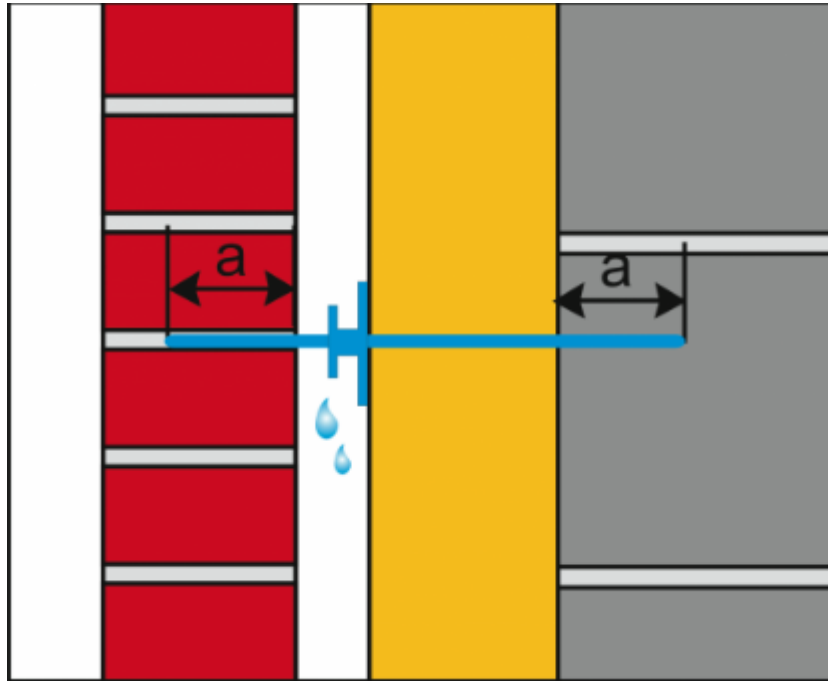


Рисунок 20 — Приклад трьохшарової стіни з ізоляційною серцевиною

5. Вогнестійкість

Матеріали повинні відповідати нормам вогнестійкості, особливо в житловому будівництві. Бетонні суміші самі по собі мають високу вогнестійкість, однак варто враховувати додаткові шари (наприклад, оздоблення, утеплювач), які можуть знижувати цей показник.

6. Сумісність з інженерними системами

Під час проектування конструкцій потрібно передбачити:

- місця для прокладання електропроводки, водопостачання, каналізації;
- технологічні отвори для вікон, дверей, вентиляції;
- можливість кріплення елементів (полиці, обладнання) до стін.

У деяких випадках використовують вставні модулі для комунікацій, які закладаються в процесі друку або монтуються після.

7. Екологічність та утилізація

Останнім часом все більше уваги приділяється екологічному сліду будівництва. Матеріали для 3D-друку мають бути:

- безпечними для здоров'я;
- такими, підлягають переробці або утилізації;
- виготовленими з мінімальними викидами CO₂.

Особливу цінність мають суміші на основі відходів промисловості (шлаки, зола, скlobій).

Конструкції, виготовлені методом 3D-друку, мають задовольняти широкий спектр технічних вимог, які забезпечують їх довговічність, безпеку та ефективність у експлуатації. Технологія продовжує вдосконалюватися, і кожного року з'являються нові стандарти, які дозволяють інтегрувати 3D-друк у масове будівництво. Забезпечення якості конструкцій залежить не лише від обладнання, але й від грамотного проєктування, точності друку та властивостей використовуваних матеріалів.

3.4 Підготовка до друку: проєктування, моделювання, перевірка геометрії

Успішна реалізація будівельного об'єкта за допомогою 3D-друку починається не з самого процесу друку, а з ґрунтовної підготовки. Враховуючи інноваційність і точність технології, етапи проєктування, 3D-моделювання та перевірки геометрії є критично важливими. Вони визначають, наскільки надійною, економічною та ергономічною буде майбутня будівля.

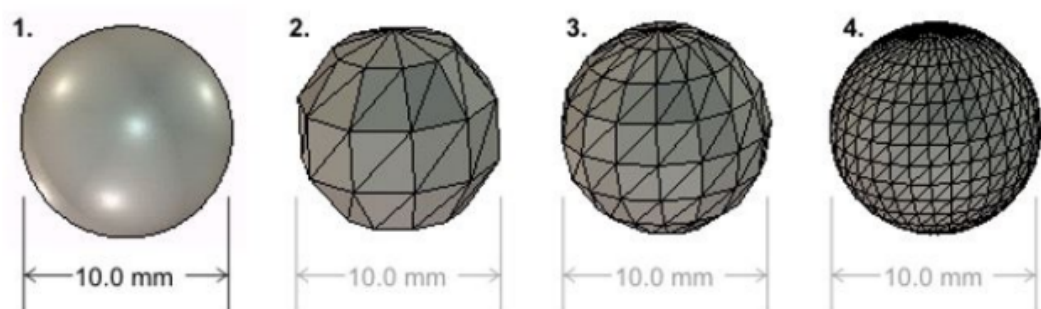


Рисунок 21 — Порівняння CAD і STL-моделей

Таблиця 10 — Підготовка до друку: проектування, моделювання, перевірка геометрії

Етап підготовки	Опис	Інструменти/Програми	Ключові завдання	Результат
Проектування	Створення архітектурної та інженерної 3D-моделі будівлі з урахуванням технології друку	AutoCAD, Revit, ArchiCAD	Врахування технологічних обмежень, товщини шарів	Детальна цифрова модель будівлі
Моделювання (слайсинг)	Розбиття 3D-моделі на шари для послідовного друку, налаштування параметрів друку	Cura, Slic3r, Simplify3D, спеціальні будівельні ПО	Визначення товщини шару, швидкості, температури	Готовий файл керування принтером
Перевірка геометрії	Автоматична та ручна перевірка моделі на наявність помилок (дірки, перетини, дефекти)	Netfabb, Meshmixer, Autodesk Meshmixer	Виявлення і виправлення геометричних дефектів	Відкоригована і технічно коректна модель
Оптимізація конструктивних елементів	Корекція моделі для підвищення міцності та ефективності друку	CAD-програми, FEA-аналітичні інструменти	Аналіз напружень, усунення слабких місць	Надійна і економічна конструкція
Підготовка підтримок	Проектування тимчасових опорних структур для стабілізації друку	Програми слайсингу, CAD-системи	Забезпечення стабільності надрукованих	Відповідні підтримки для друку

			елементів	
--	--	--	-----------	--

1. Архітектурно-планувальне проектування під 3D-друк

Архітектура будинку, який друкується на 3D-принтері, має свою специфіку. Вона формується не тільки з міркувань естетики чи функціональності, а й з урахуванням можливостей та обмежень технології друку:

- Конструкції проектуються з переважанням криволінійних форм, оскільки саме вони дозволяють зменшити напруження в матеріалі, мінімізувати тріщини та скоротити витрати матеріалу.
- Стіни часто є монолітними і одношаровими, тому в архітектурі мають бути передбачені ізоляційні порожнини або додаткові рішення щодо термозахисту.
- Віконні та дверні прорізи повинні бути оптимально розміщені з урахуванням рівномірного розподілу навантаження.

Таким чином, архітектор працює не лише над формою, а над її адаптацією до алгоритму руху принтера. У цьому контексті 3D-друк змінює саму філософію архітектури — від кубічної стандартності до органічної логіки форм.

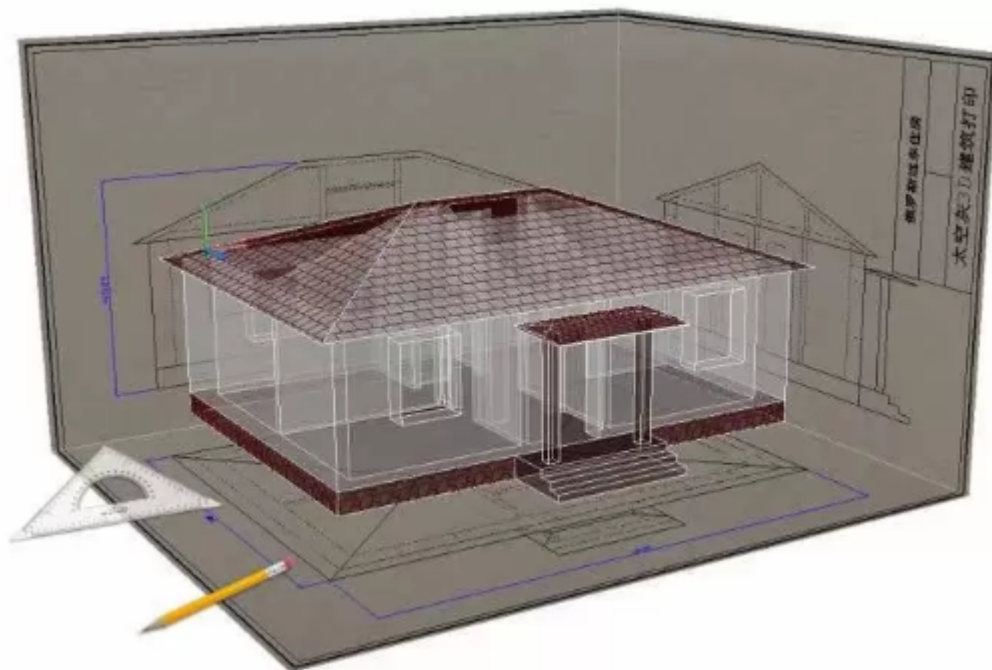


Рисунок 22 — Приклад органічного планування будинку для друку на 3D-принтері

2. 3D-моделювання у CAD-середовищі

Після ескізного проєктування будівля переходить на стадію цифрового моделювання у спеціальному програмному забезпеченні (CAD/BIM). Тут створюється точна 3D-модель будівлі, яка враховує всі геометричні, інженерні та конструктивні аспекти.

Для 3D-друку модель має бути:

- водонепроникною (watertight) — без розривів і помилок у геометрії;
- оптимізованою під slicing — тобто поділ на шари має відбуватись без геометричних помилок;
- топологічно правильною — щоб уникнути зміщень шарів під час друку.

На цьому етапі архітектор і інженер тісно співпрацюють з оператором 3D-принтера, щоб адаптувати модель до особливостей конкретної машини (ширина сопла, висота шару, швидкість подачі суміші).

Також важливо враховувати відсутність опорних структур — на відміну від дрібних 3D-друків, будівельні принтери не використовують підтримки, тому усі нависаючі елементи повинні або мати опору, або бути спроектованими з урахуванням кута нахилу, допустимого для принтера (зазвичай до 30°).

3. Аналіз і перевірка геометрії

Перед запуском друку необхідно здійснити ретельну перевірку 3D-моделі:

- Геометричний аналіз — виявлення перетинів поверхонь, помилок у топології, перевірка відповідності масштабів;
- Структурний аналіз — проведення розрахунків на міцність, особливо у зонах прорізів, кутів, стиків;

- Аналіз зручності друку — визначення траєкторій руху сопла, можливості безперервного друку без зупинок, уникнення перехльостів або розривів.

На цьому етапі зазвичай використовується програмне забезпечення типу *Cura*, *Slic3r*, *Grasshopper* (у зв'язці з *Rhino3D*), *Revit* + *Dynamo*, яке дозволяє адаптувати модель до G-коду — інструкцій для роботи принтера.

Також інженери перевіряють час друку, кількість витрат матеріалу, а іноді — роблять тестовий друк фрагмента конструкції у зменшеному масштабі, щоб виявити можливі деформації або дефекти.



Рисунок 23 — Слайсер 3д принтера

4. Підготовка основи та калібрування принтера

Останній підетап — підготовка фізичного середовища, де буде здійснюватися друк:

- Основа (фундамент) повинна бути ідеально вирівняна та жорстка;
- Принтер має бути відкалібрований: перевіряється точність подачі матеріалу, рух платформи, стабільність температурного режиму (за потреби);
- Забезпечується захист від погодних умов (навіси, тенти, обігрівачі — якщо зовнішній друк у холодну пору).

Ефективність будівельного 3D-друку напряду залежить від якості підготовчого етапу. Помилки на стадії моделювання чи перевірки можуть призвести до фізичного браку, втрат матеріалу, порушення геометрії конструкцій або навіть повного руйнування частини об'єкта. Тому проєктування, моделювання та аналіз стають фундаментальною основою успішного друку, особливо якщо мова йде про створення комфортного та естетичного житла, в якому дійсно хочеться жити.

Удосконалення друкуючої головки будівельного 3D-принтера

4.1 Передумови до вдосконалення

У сучасному будівельному 3D-друці ключовим елементом, що визначає якість, швидкість і стабільність процесу, є друкуюча головка принтера. Саме вона відповідає за формування матеріалу у вигляді шарів, які згодом перетворюються у цілісну конструкцію. Однак аналіз існуючих конструкцій показує, традиційні головки мають низку обмежень, які стають критичними при масштабному або багатокomпонентному друці.

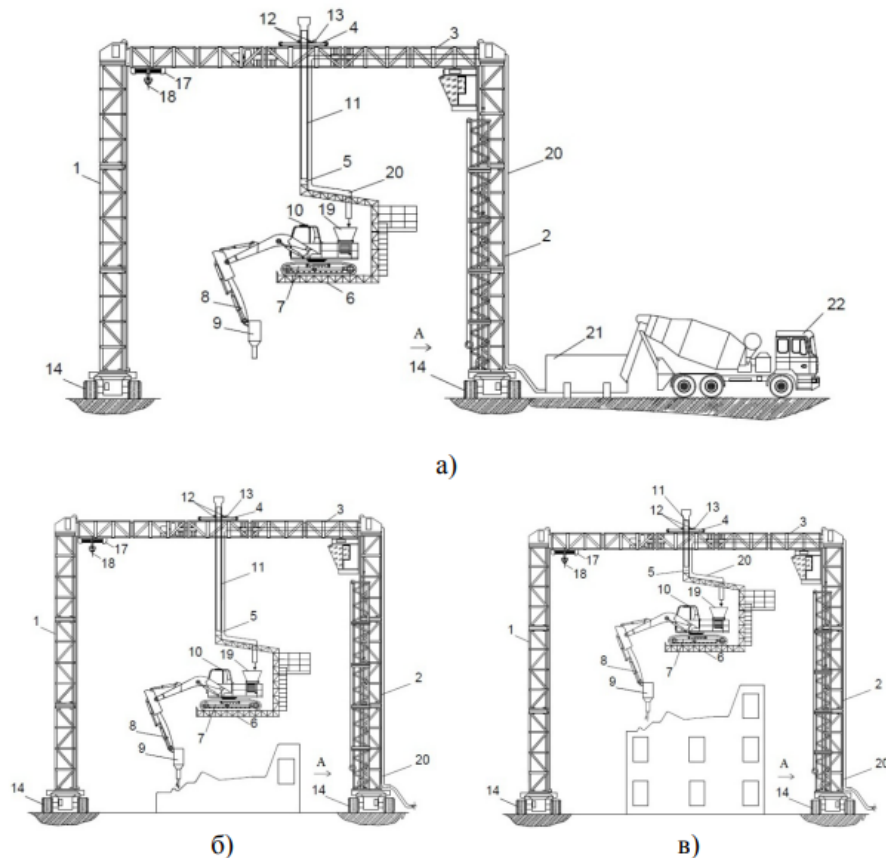


Рисунок 24 — Принтер, забезпечений будівельним маніпулятором: а – загальний вигляд; б, в – етапи зведення об’єкту; 1, 2 – опори; 3 – мост; 4 – візок; 5 – балка; 6 – платформа; 7 – маніпулятор; 8 – телескопічне обладнання; 9 – головка друку; 10 – кабіна; 11 – зубчата рейка; 12 – шестерні; 13 – привод шестерень; 14 – гусеничні візки; 17 – вантажний візок; 18 – гакова підвіска; 19 – приймальний бункер; 20 – трубопровід; 21 – бетононасос; 22 – бетоновоз

Основні технічні недоліки типових друкуючих головок включають:

- Великий об’єм попередньо приготованої суміші, яка подається до головки централізовано через шланги або трубопроводи. Це створює ризик передчасного затвердіння матеріалу, особливо при використанні сумішей з обмеженим часом життя.
- Складність адаптації до зміни складу матеріалу під час друку. У більшості випадків суміш готується у фіксованому складі й не може бути швидко змінена без повної зупинки процесу.
- Висока трудомісткість очищення системи, що призводить до простоїв і втрат матеріалу після завершення роботи.

- Обмежена гнучкість у формуванні елементів різної складності — однакове сопло використовується як для друку несучих стін, так і для другорядних конструкцій, не оптимізує витрати матеріалу.

- Мала інтеграція керування з іншими системами принтера — подача компонентів і екструзія працюють як окремі модулі, ускладнює синхронізацію.

У контексті зростання інтересу до друку з багатокомпонентних матеріалів — наприклад, армованих бетонів, утеплених сумішей, швидкотвердіючих складів — необхідність удосконалення конструкції головки стає надзвичайно актуальною. Таке вдосконалення має забезпечити:

- мінімізацію втрат суміші, особливо при зупинках або аваріях; зменшення внутрішнього об'єму друкуючого модуля, щоб уникнути застою матеріалу;

- можливість динамічного регулювання складу суміші під час друку — наприклад, друк зовнішніх і внутрішніх стін із різними властивостями;

- адаптацію геометрії сопла до типу друкованої конструкції, що дозволить економити матеріал і друкувати з більшою точністю.

На підставі аналізу вітчизняного та закордонного досвіду, а також патентних досліджень (у т.ч. аналогів за Фіг.1–2), було запропоновано створити інтегровану друкуючу головку нового типу, в якій поєднані функції змішування, екструзії та адаптації потоку.

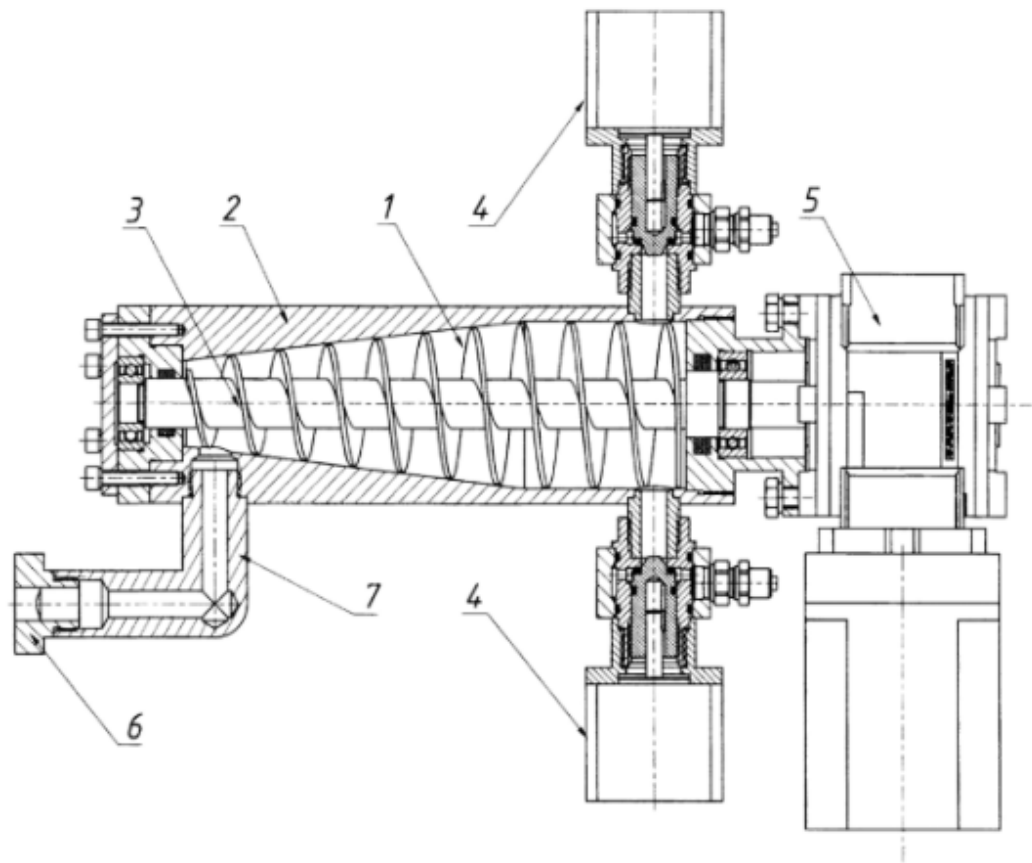


Рисунок 25 — Інтегрована друкуюча головка нового типу

Таке рішення є універсальною відповіддю на сучасні виклики, пов'язані з широким застосуванням 3D-друку у будівництві — від соціального житла до складних енергоефективних споруд, де вартість, швидкість і точність мають критичне значення.

4.2 Конструктивні особливості вдосконаленої головки

Удосконалена друкуюча головка будівельного 3D-принтера (рис. Фіг. 1, Фіг. 2) являє собою інтегрований функціональний вузол, поєднує в собі процеси змішування, екструзії та нанесення багатокомпонентної будівельної суміші. Основна мета такої конструкції — мінімізувати втрати матеріалу, забезпечити оперативне регулювання складу суміші та спростити обслуговування принтера під час і після друку.

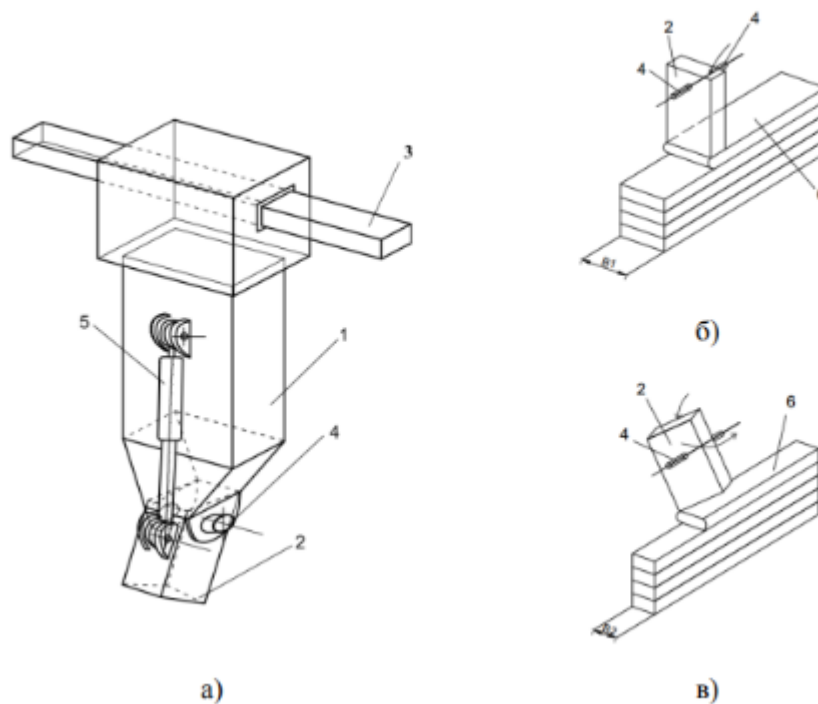


Рисунок 26 — Головка друку із змінною шириною шару бетону: а – загальний вигляд; б, в – укладання шарів бетону. 1 – корпус; 2 – екструдер; 3 – направляюча; 4 – вісь; 5 – привод

Загальна будова

Друкуюча головка складається з таких основних функціональних елементів:

1. Смеситель-екструдер (1) — центральний елемент головки, в якому відбувається підготовка суміші. Він містить:
 - корпус (2), виготовлений із стійкого до стирання матеріалу;
 - шнек (3), що складається з циліндричної частини для перемішування та конічної частини для ущільнення і створення тиску перед соплом;
 - привід шнека (5) — може бути електричним, гідравлічним або комбінованим; для аварійних ситуацій передбачено механізм ручного провертання.
2. Клапани для подачі компонентів (4) — розміщені на корпусі змішувача, забезпечують контрольовану подачу окремих компонентів

(вода, цемент, добавки, пластифікатори). Це дозволяє динамічно змінювати склад суміші в залежності від друкованого елемента.

3. Сопло (6) — вихідна частина, через яку матеріал подається до об'єкта. Сопло може бути:

- статичним (Фіг. 1) — приєднане безпосередньо до екструдера;
- з'єднаним через проміжний елемент (7) (Фіг. 2) — дозволяє оптимізувати його розташування та орієнтацію відносно осі друку.

4. Змінна або регульована насадка сопла — на відміну від класичних моделей, тут можлива установка механізму з різним внутрішнім діаметром або телескопічною конструкцією, яка дозволяє переходити від друку товстих шарів до точного нанесення вузьких смуг матеріалу.

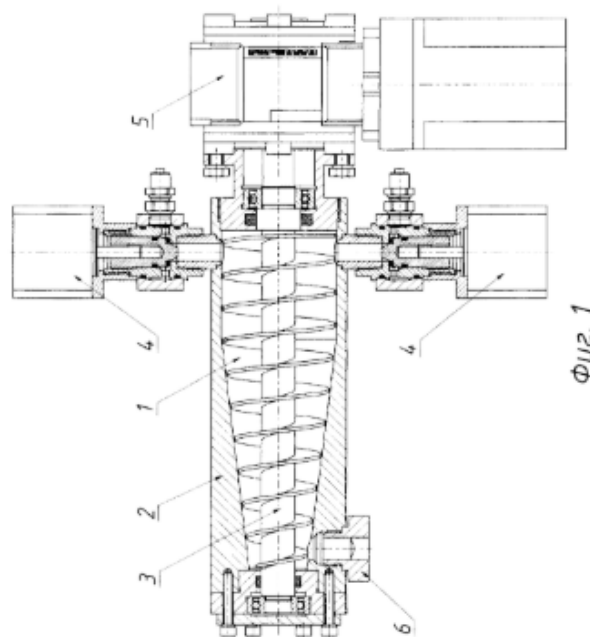


Рисунок 27— Конструктивні особливості вдосконаленої головки

Особливості конструкції

- Компактність головки — поєднання екструдера та сопла в одному корпусі зменшує загальний об'єм пристрою, що критично важливо при друці у складних просторових умовах або при монтажі на маніпулятор.

- Універсальність геометрії — завдяки з'єднувальному елементу (7), сопло може бути встановлено під різним кутом або зміщене в площині XY, забезпечує більшу гнучкість у проєктуванні та друці.
- Застосування надрукованих або пластикових компонентів — дозволяє зменшити масу головки та вартість виготовлення, а також швидко змінювати конфігурацію при ремонті або модифікації.
- Мінімальний об'єм внутрішніх порожнин — сприяє зменшенню кількості залишків матеріалу після друку і полегшує очищення.

Принцип дії шнека

Шнек є ключовим елементом, він забезпечує якісне перемішування та екструзію. У циліндричній зоні він виконує функцію змішування окремих компонентів, які подаються через клапани. Далі суміш потрапляє у конічну частину, де за рахунок стискання створюється необхідний тиск для подачі через сопло. Така конфігурація дозволяє уникати розшарування суміші та забезпечує стабільну подачу навіть при зміні густини.

Інтеграція з системами керування принтера

Передбачено можливість підключення всіх компонентів головки (шнек, клапани, сопло, зміна діаметру) до єдиного електронного блоку управління дозволяє реалізувати:

- автоматичне перемикання режимів подачі (наприклад, на кутах, стиках);
- адаптивне керування складом суміші;
- зупинку та реверс у випадку надлишкового тиску;
- самодіагностику та моніторинг температури, в'язкості, тиску.

4.3 Переваги запропонованого рішення

Удосконалена конструкція друкуючої головки будівельного 3D-принтера, яка поєднує в одному вузлі функції змішування, екструзії та нанесення багатокомпонентної суміші, має низку суттєвих переваг, які дозволяють істотно підвищити ефективність та гнучкість процесу друку порівняно з традиційними рішеннями.

Однією з ключових переваг є зменшення втрат матеріалу. В класичних системах будівельного 3D-друку значна частина суміші втрачається через її передчасне затвердіння або залишки в подаючих магістралях після зупинки процесу. Це особливо актуально при використанні сумішей з коротким терміном тужавіння. Удосконалена головка дозволяє готувати суміш безпосередньо перед її нанесенням, виключаючи необхідність зберігати великі об'єми готового матеріалу у транспортній системі. Таким чином досягається суттєве скорочення втрат, а також знижується навантаження на систему промивання і обслуговування.

У головці (рис), яка містить корпус для будівельної суміші та екструдер з вихідним отвором, екструдер додатково оснащений механізмом регулювання перерізу отвору, виконаний у вигляді рухомої вкладки з гвинтовим приводом. Це дозволяє регулювати ширину шару будівельної суміші, яка укладається, в залежності від технологічних вимог будівництва. Головка містить корпус 1 й екструдер 2 з отвором 3 та переміщується по направляючій 4. На зовнішній поверхні екструдера 2 встановлений механізмом регулювання перерізу отвору 4, виконаний у вигляді рухомої вкладки 5 з гвинтовим приводом, який складається з гвинтів 6 з рукоятками 7 та гайок 8. 49 Головка працює таким чином. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 4, через отвір 3 екструдера 2 надходить суміш 9 та укладається у вигляді шарів бетону 10 шириною B1 (рис. 1.24, г), які формують фрагмент будівельного об'єкту. У разі необхідності зміни ширини шару 11 будівельної суміші 9, за допомогою рукояток 7 та гвинтів 6 виконується переміщення вкладки 5, що забезпечує укладання суміші з іншою шириною шару, наприклад B2 (рис)

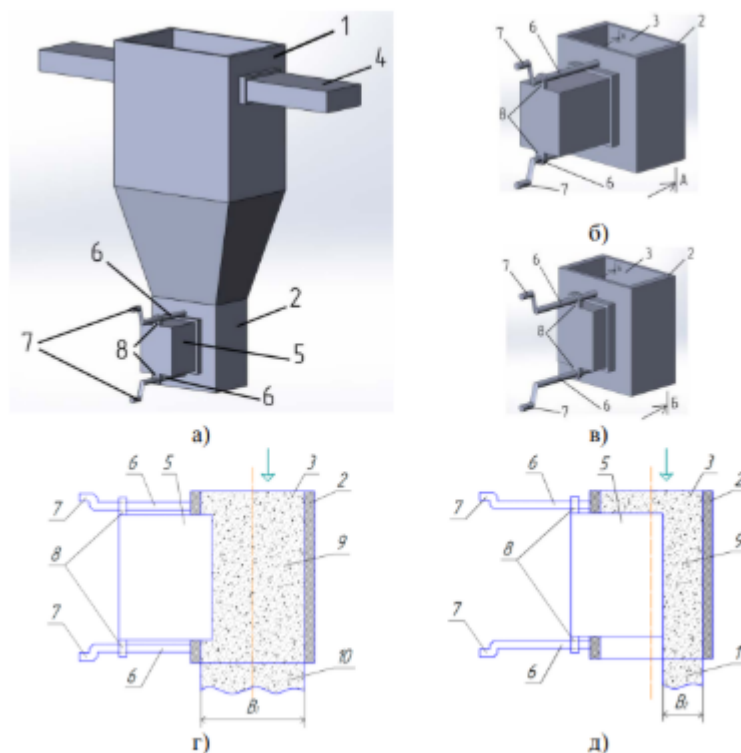


Рисунок 28 — Головка друку із змінною шириною шару бетону: а) — загальний вигляд; б) ... д) — екструдер з різними положеннями вкладки. 1 — корпус; 2 — екструдер; 3 — направляюча; 4 — направляюча; 5 — вкладка; 6 — гвинт; 7 — рукоятка; 8 — гайка; 9 — суміш; 10, 11 — шар бетону

Виконання головки з механізмом регулювання перерізу отвору подачі суміші у вигляді рухомої вкладки з гвинтовим приводом, забезпечує швидке регулювання ширини шару суміші в залежності від технологічних вимог, підвищує продуктивність 3D-друку будівельних об'єктів

Ще однією важливою перевагою є покращення якості змішування компонентів. Завдяки реалізації шнека з циліндричною і конічною частинами, забезпечується не лише ефективне перемішування інгредієнтів у першій зоні, але й ущільнення суміші у другій зоні. Це дозволяє формувати однорідну масу з заданими характеристиками та забезпечити стабільну подачу під тиском, що є критичним для точності укладання шарів.

Конструкція передбачає можливість динамічного регулювання складу суміші за допомогою системи клапанів. Це відкриває нові можливості для адаптації рецептури суміші безпосередньо в процесі друку. Наприклад, можна варіювати вміст армувальних волокон, регулювати в'язкість або щільність залежно від призначення друкованого елемента — несучої стіни, утепленої перегородки чи декоративного фрагменту. Усе це дозволяє знизити загальну вартість конструкції без шкоди для її функціональності.

Суттєвою інновацією є використання змінного або регульованого сопла, яке дозволяє оперативно адаптувати діаметр отвору до поточних потреб друку. Це дає змогу не тільки прискорити процес укладання масивних елементів, використовуючи товсті шари, але й досягати високої точності при формуванні складних або дрібних деталей. Таке рішення забезпечує як гнучкість, так і ефективність роботи обладнання.

Окрему увагу слід приділити зручності очищення та обслуговування головки. Наявність механізму ручного прокручування шнека дозволяє без демонтажу прочистити внутрішні канали від застиглої суміші у випадку аварійної зупинки або завершення друку. Це значно скорочує простой та підвищує надійність обладнання у важких виробничих умовах.

Головка також відзначається модульністю і універсальністю. Її конструкція дозволяє інтегрувати пристрій як у порталні принтери, так і у роботизовані платформи. Компактні розміри, можливість змінювати орієнтацію сопла за допомогою з'єднувального елемента, а також використання легких неметалевих матеріалів або елементів, виготовлених методом 3D-друку, роблять цей модуль придатним для адаптації до широкого спектру задач.

Завдяки точному керуванню приводами, клапанами та іншими активними елементами головки, вдається забезпечити дозовану подачу матеріалів відповідно до реальних потреб. Це, у свою чергу, зменшує енергоспоживання, знижує навантаження на механічні вузли та сприяє загальному підвищенню економічної ефективності друку.

Узагальнюючи вищенаведене, можна зробити висновок, що запропоноване рішення забезпечує комплексне покращення процесу 3D-друку у будівництві. Воно поєднує в собі точність, гнучкість, надійність та економічність, яке дозволяє говорити про значний потенціал такого підходу як для модернізації наявних систем, так і для створення нових поколінь 3D-принтерів.

4.4 Принцип дії вдосконаленої головки

Удосконалена друкуюча головка будівельного 3D-принтера працює за принципом безперервного змішування та екструзії багатокомпонентної будівельної суміші, при цьому забезпечується точна дозована подача компонентів, ефективне їх перемішування та формування вихідного потоку з необхідними параметрами для укладання матеріалу в задану геометричну форму.

Процес функціонування умовно можна поділити на кілька етапів:

1. Дозована подача компонентів

Кожен компонент суміші (вода, цемент, мінеральні або хімічні добавки, армувальні волокна) подається до змішувальної камери через окремі клапани, розташовані на корпусі головки. Ці клапани можуть мати електричне або пневматичне керування та дозволяють точно регулювати кількість кожного інгредієнта в режимі реального часу відповідно до заданої рецептури. При потребі програмне забезпечення може змінювати співвідношення компонентів без зупинки процесу друку.

2. Перемішування у шнеку

Після подачі компоненти потрапляють у змішувальну зону — циліндричну частину шнека. Тут відбувається основне перемішування за рахунок обертального руху шнека. Обертання забезпечується електричним або механічним приводом, а в разі аварійної ситуації передбачено можливість ручного прокручування шнека за допомогою спеціального елемента, що дозволяє вивести залишки суміші з головки.

Циліндрична частина відповідає за гомогенізацію компонентів, тобто досягнення рівномірної консистенції. Залежно від в'язкості та швидкості обертання шнека може регулюватись ступінь перемішування.

3. Ущільнення і створення тиску

Після проходження змішувальної зони суміш потрапляє в конічну частину шнека, де вона ущільнюється. Звуження каналу створює внутрішній тиск, необхідний для стабільної подачі суміші до сопла. За рахунок такого ущільнення зменшується кількість повітряних включень і забезпечується рівномірність потоку.

Цей етап дозволяє уникати розшарування суміші та забезпечує високу якість кінцевого шару на виході.

4. Подача до сопла і формування потоку

Після екструзії через шнек суміш надходить безпосередньо до сопла, яке або інтегроване до корпусу головки, або підключене через з'єднувальний елемент. Сопло формує остаточну геометрію потоку матеріалу.

Удосконалена конструкція дозволяє використання змінного або регульованого сопла, яке забезпечує адаптацію діаметру вихідного отвору. Це дозволяє:

- формувати шари різної товщини;
- змінювати ширину нанесення без заміни головки;
- забезпечити точне укладання у складних або обмежених зонах конструкції.

Регулювання діаметра може здійснюватися автоматично за допомогою керованого механізму або шляхом зміни насадок відповідно до етапу будівництва.

5. Синхронізація з керуючою системою принтера

Усі елементи головки інтегруються з системою керування 3D-принтера. Сигнали з ПЛК або контролера дозволяють:

- регулювати швидкість обертання шнека;
- керувати відкриттям/закриттям клапанів;
- змінювати геометрію сопла;
- запускати режим промивання або аварійного очищення;
- виводити інформацію про тиск, в'язкість і стан головки на інтерфейс оператора.

Це забезпечує високий рівень автоматизації та дає змогу інтегрувати головку в складні багатозадачні процеси без потреби в ручному втручанні.

Таким чином, принцип дії удосконаленої друкуючої головки базується на поетапному приготуванні, перемішуванні, екструзії та адаптивному формуванні потоку матеріалу, дозволяє забезпечити стабільність процесу, високу якість друку та ефективність у роботі з багатокомпонентними сумішами. Такий підхід є технічно обґрунтованим та практично доцільним для сучасного будівництва із застосуванням адитивних технологій.

4.5 Варіанти реалізації і вибір матеріалів

Конструкція удосконаленої друкуючої головки дозволяє реалізувати кілька альтернативних технічних рішень залежно від умов експлуатації, типу друкованих об'єктів, доступного обладнання та бюджету проєкту. Гнучкість конструкції забезпечує як масштабованість, так і адаптивність до різних архітектурних, логістичних або технічних вимог.

1. Варіанти приводів

У конструкції головки можливе застосування кількох типів приводів для основних функціональних вузлів, зокрема для шнека, клапанів, системи зміни діаметру сопла:

- Електричні приводи (найбільш універсальні) — підходять для більшості застосувань завдяки точності керування, енергоефективності та простоті інтеграції з системою автоматизації. Зокрема, для приводу шнека можуть використовуватись редукторні

мотор-редуктори з інвертором або крокові двигуни.

- Пневматичні приводи — ефективні для керування клапанами подачі матеріалів. Вони забезпечують швидке перемикання станів, мають просту конструкцію і добре працюють у запилених або вологих умовах.
- Гідравлічні приводи — можуть застосовуватись у важких умовах або для масштабних принтерів, де потрібна висока потужність при обмеженому об'ємі. Особливо корисні в приводі великогабаритного шнека.
- Комбіновані приводи — поєднання електромеханічного приводу шнека з пневматичним керуванням клапанів дозволяє досягти балансу між точністю та швидкістю роботи.

Вибір типу приводу залежить від масштабу принтера, рівня автоматизації, потужності джерела живлення та вимог до обслуговування.

2. Матеріали для виготовлення елементів головки

Вибір матеріалів є критичним для забезпечення довговічності, ремонтпридатності та зниження маси друкуючої головки. Залежно від умов експлуатації можливі такі варіанти:

- Металеві матеріали — нержавіюча сталь, алюмінієві сплави або спеціальні зносостійкі сталі застосовуються для виготовлення шнека, корпусу екструдера та вузлів, що працюють під тиском і з абразивними компонентами. Такі матеріали забезпечують високу міцність і стійкість до стирання.
- Полімери технічного призначення — наприклад, поліамід (PA), поліпропілен (PP), поліетилен високої щільності (HDPE), армовані композити. Вони можуть використовуватись для зовнішніх оболонок, кріплень, ущільнювальних елементів та деталей з низьким навантаженням. Головна перевага — низька маса та стійкість до корозії.
- Термостійкі полімери з армуванням — використовуються для елементів, які можуть бути надруковані на самому 3D-принтері (наприклад, адаптери, змінні насадки, з'єднувальні елементи). Це дозволяє оперативно виготовляти чи замінювати компоненти без

необхідності складного механічного оброблення.

- Комбіновані вузли — використання металевого шнека у пластиковому корпусі або гібридне сопло (метал+пластик) дозволяє оптимізувати масу, витрати та технологічність.

3. Технологічні варіанти виготовлення

- Традиційна механічна обробка — підходить для серійного виготовлення корпусів і шнеків, потребують точної геометрії та стійкості до навантажень.
- Тривимірний друк деталей — дозволяє виготовляти адаптовані вузли та змінні частини головки без використання складного обладнання. Це особливо ефективно для:
 - швидкої заміни зношених елементів;
 - тестування нових конфігурацій;
 - персоналізації конструкції під конкретне застосування.
- Лазерне або плазмове різання та зварювання — можуть застосовуватись для формування каркасів або з'єднувальних рам.

4. Конструктивна адаптивність

Конструкція головки розроблена таким чином, щоб її можна було масштабувати або адаптувати до різних моделей принтерів:

- Зміна габаритів дозволяє використовувати головку на великогабаритних або малих мобільних системах;
- З'ємні вузли забезпечують можливість швидкої заміни сопел, шнеків або приводів без демонтажу всієї головки;
- Модульна архітектура дає змогу оновлювати окремі функціональні блоки — наприклад, додавати нові канали подачі, сенсори тиску, автоматизовану систему промивки тощо.

Таким чином, запропонована мною конструкція головки дозволяє реалізувати широке розмаїття технічних рішень із урахуванням цільового призначення обладнання, доступного виробничого ресурсу та потреб конкретного проекту. Вибір приводів, матеріалів і

технологій виготовлення забезпечує як функціональну ефективність, так і економічну доцільність експлуатації пристрою.

4.6 Можливості масштабування та адаптації

Однією з ключових переваг запропонованої конструкції друкуючої головки є її висока адаптивність до різних умов експлуатації, масштабів друку та типів будівельних об'єктів. Завдяки модульній архітектурі, можливості гнучкого компонування та використанню універсальних з'єднувальних елементів, головка може бути застосована в широкому діапазоні 3D-друкарських систем.

1. Масштабування розмірів і продуктивності

Конструкція головки дозволяє змінювати основні геометричні параметри — діаметр шнека, об'єм змішувальної камери, довжину каналу екструзії, діаметр сопла — відповідно до вимог конкретного проекту. Це дає змогу створювати варіанти для:

- великих порталних принтерів, призначених для друку будівель повного розміру, де необхідна висока продуктивність і велика ширина шару;
- середніх мобільних систем, здатних працювати на майданчику з обмеженим простором (наприклад, у щільній міській забудові);
- компактних експериментальних або навчальних установок, де важливими є компактність, універсальність і знижена витрата матеріалу.

Також можливе масштабування пропускної здатності за рахунок збільшення потужності приводу шнека, кількості каналів подачі або тиску подачі суміші.

2. Адаптація під різні типи матеріалів

Головка здатна працювати з широким спектром будівельних матеріалів, включаючи:

- цементно-піщані суміші з домішками;
- легкі бетонні склади;

- суміші з теплоізоляційними добавками (перліт, вермикуліт тощо);
- армовані фіброю або короткими волокнами розчини;
- біополімерні склади на основі глини, ґрунту, композитів.

Адаптація до роботи з конкретним матеріалом може бути реалізована шляхом зміни профілю шнека, швидкості обертання, типу сопла, температурного режиму або налаштувань системи подачі. Це забезпечує високу універсальність у виборі матеріалів відповідно до кліматичних, конструкційних або екологічних вимог.

3. Інтеграція з різними типами принтерів

Універсальна архітектура головки дозволяє її застосування на обладнанні з різними кінематичними схемами, зокрема:

- порталні принтери з тривісною кареткою (XY-Z);
- маніпулятори або роботизовані руки (типу SCARA або Delta);
- гусеничні або колісні мобільні принтери, переміщуються навколо будівельного майданчика;
- настінні друкарські системи, в яких головка кріпиться безпосередньо до конструкції будівлі.

З'єднувальні елементи та система керування головою можуть бути адаптовані до конкретного принтера без суттєвої перебудови, що спрощує інтеграцію в існуючі або нові комплекси.

4. Можливість розширення функціоналу

Модульна конструкція дозволяє легко додавати нові елементи або модифікувати існуючі без радикальної перебудови пристрою. Серед можливих доповнень:

- модулі автоматичної промивки або очистки;
- датчики температури, тиску, вологості або витрати;
- адаптивні сопла зі змінною геометрією;
- багатоканальні системи подачі з окремим регулюванням рецептури.

Це забезпечує перспективу розвитку головки як платформи, може адаптуватися до нових технологічних вимог, матеріалів або алгоритмів управління.

5. Персоналізація під вимоги конкретного проєкту

У практиці будівництва часто виникає необхідність адаптувати друкуючу систему до обмежених умов — наприклад, обмежена висота простору, складна конфігурація об'єкта або специфічні вимоги до властивостей матеріалу. Завдяки широкому спектру регулювань, головка може бути персоналізована під конкретне завдання, що забезпечує:

- підвищену ефективність;
- зменшення витрат часу на налаштування;
- уникнення простоїв або помилок у процесі друку.

У підсумку, запропонована конструкція друкуючої головки є відкритою платформою для подальшої модернізації, масштабування та функціонального збагачення. Вона поєднує технічну простоту з високим потенціалом адаптації до нових умов і вимог, робить її придатною як для промислових, так і для дослідницько-експериментальних застосувань.

4.7 Висновки до розділу

У даному розділі було детально розглянуто конструкцію та функціональні особливості удосконаленої друкуючої головки для будівельного 3D-принтера, поєднує в собі функції змішування, екструзії та нанесення будівельних багатокомпонентних сумішей. Запропоноване технічне рішення вирішує низку ключових проблем, притаманних традиційним головкам, зокрема: перевитрату матеріалу, складність очищення, обмежену гнучкість у зміні складу суміші та фіксовану геометрію сопла.

Удосконалена головка забезпечує формування суміші безпосередньо перед її подачею до сопла, що дозволяє зменшити об'єм залишків і втрат при зупинках, скоротити час очищення системи та використовувати склади з коротким часом тужавіння. Завдяки

наявності клапанів для окремої подачі компонентів, можливе регулювання рецептури суміші у реальному часі. Реалізація шнека зі змішаною геометрією (циліндричною та конічною частинами) сприяє ефективному перемішуванню та стабільній подачі під тиском.

Особливу увагу приділено адаптивності конструкції — змінна геометрія сопла дозволяє налаштовувати ширину шару залежно від типу друкуемого елемента, підвищує точність і зменшує витрати матеріалу. Конструкція підтримує різні варіанти приводів, включаючи електричні, пневматичні та гідравлічні, воно дозволяє інтегрувати її у широкий спектр принтерів з різною кінематикою та архітектурою.

Також головка може бути масштабована відповідно до габаритів друку, типів сумішей та умов експлуатації. Її модульна архітектура відкриває можливості подальшого функціонального розширення, в тому числі встановлення сенсорів, додаткових подаючих каналів, систем самоочищення тощо. Це робить конструкцію перспективною не лише для використання в існуючих 3D-друкувальних системах, але й як базу для створення нових типів будівельного обладнання.

Загалом, удосконалена друкуюча головка сприяє підвищенню ефективності, надійності та гнучкості будівельного 3D-друку, знижує експлуатаційні витрати, скорочує втрати матеріалу і забезпечує вищу якість друкованих об'єктів, цілком відповідає сучасним тенденціям у сфері автоматизованого будівництва.

Техніко-економічне обґрунтування

5.1 Орієнтовна вартість будівництва 3D-друком

Техніко-економічне обґрунтування є важливою складовою дипломної роботи, оскільки дозволяє оцінити ефективність використання 3D-друку у будівництві з точки зору вартості, ресурсів і термінів. Одним із ключових показників є орієнтовна вартість будівництва будинку за допомогою 3D-принтера, яка формується з урахуванням різних факторів: матеріалів, обладнання, робіт, логістики тощо.

1. Структура вартості будівництва

Вартість будівництва 3D-домів складається з кількох основних компонентів, які разом формують повну суму інвестицій. Найперше – це вартість матеріалів, які використовуються для друку конструкцій. Без якісної та відповідної сировини процес не може бути успішним, адже вона визначає міцність, довговічність і безпеку будинку. Наступним важливим компонентом є вартість робіт, яка включає не тільки зарплату операторів 3D-принтерів, а й додаткові будівельні та оздоблювальні роботи, не можуть бути автоматизовані. Вартість обладнання, тобто 3D-принтера та його обслуговування, також має вагоме значення, адже ці пристрої є дороговартісними технологічними комплексами з обмеженим ресурсом роботи. Логістика – окремий пункт витрат, який включає доставку матеріалів до місця будівництва, транспортування самого обладнання та інші пов’язані послуги. І нарешті, адміністративні витрати — це сукупність непрямих витрат, таких як оформлення документів, страхування, податки та можливі непередбачені витрати, також формують загальну вартість проєкту. Важливо розуміти, що всі ці компоненти взаємопов’язані, і оптимізація кожного з них впливає на кінцеву ціну будівництва.

Загальна орієнтовна вартість будівництва $C_{\text{заг}}$ формується за формулою:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{роб}} + C_{\text{облад}} + C_{\text{лог}} + C_{\text{адм}}$$

де:

- $C_{\text{мат}}$ — вартість матеріалів;
- $C_{\text{роб}}$ — вартість робіт (в тому числі управління 3D-принтером, монтаж, оздоблення);
- $C_{\text{облад}}$ — амортизація та експлуатація 3D-принтера і супутнього обладнання;
- $C_{\text{лог}}$ — витрати на транспортування матеріалів і обладнання;
- $C_{\text{адм}}$ — адміністративні та непередбачені витрати.

Таблиця 15 — Орієнтовна вартість будівництва 3D-друком

Структурний елемент вартості	Опис	Фактори впливу	Приблизний відсоток від загальної вартості (%)	Примітки
Вартість матеріалів	Витрати на будівельні суміші, полімери, добавки	Ціни на матеріали, обсяги використання	40–50%	Основна частина бюджету
Вартість робіт	Оплата праці операторів, технічного персоналу, інженерів	Складність проекту, рівень автоматизації	20–30%	Менша ніж при традиційному будівництві
Амортизація та експлуатація обладнання	Знос та обслуговування 3D-принтерів і додаткової техніки	Вартість обладнання, термін служби	10–15%	Важливий фактор у довгостроковій перспективі
Витрати на логістику	Транспортування матеріалів, обладнання, готових конструкцій	Відстані, складність доставки	5–10%	Оптимізується при локальному виробництві
Додаткові витрати	Проектування, підготовка, дозвільна документація	Обсяг робіт, складність проекту	5–10%	Включає адміністративні та інженерні послуги

2. Вартість матеріалів

Матеріали — це основа будь-якого будівництва, а в технології 3D-друку вони відіграють ключову роль. Вартість матеріалів формується на підставі їх типу, кількості та якості. Для 3D-друку

застосовуються спеціалізовані бетонні суміші, що відрізняються за складом, властивостями та ціною. До того ж, використання додаткових армуючих волокон, пластифікаторів і теплоізоляційних компонентів також впливає на кінцеву вартість. Вартість матеріалів залежить від ринку, регіону та обсягу закупівлі — при великих об'ємах зазвичай діють знижки. Окрім самої вартості сировини, слід враховувати і якість, оскільки дешеві матеріали можуть призвести до збільшення витрат на ремонт та обслуговування в майбутньому. Саме тому вартість матеріалів — це не просто ціна закупівлі, а інвестиція в надійність і довговічність будинку.

Вартість матеріалів визначається через обсяг і ціну одиниці матеріалу:

$$C_{\text{мат}} = \sum_{i=1}^n V_i * P_i$$

де:

- V_i — обсяг матеріалу i (м^3 або кг);
- P_i — ціна одиниці матеріалу i ($\text{грн}/\text{м}^3$ або $\text{грн}/\text{кг}$);
- n — кількість видів матеріалів.

Приклад: якщо для будинку необхідно 100 м^3 бетонної суміші за ціною $2500 \text{ грн}/\text{м}^3$, то

$$C_{\text{мат}}^{\text{бетон}} = 100 * 2500 = 250\,000 \text{ грн}$$

3. Вартість робіт

Хоча 3D-друк значною мірою автоматизує процес зведення стін і конструктивних елементів, роль людського фактора залишається суттєвою. Вартість робіт включає оплату операторів принтерів, інженерів, фахівців із монтажу додаткових елементів, оздоблювальників і технічних працівників. Важливо враховувати, що навіть при використанні автоматизації не усі етапи будівництва можна повністю механізувати — монтаж вікон, дахів, інженерних систем і оздоблення потребують участі професіоналів. Значною

перевагою 3D-друку є суттєве скорочення часу виконання основних конструктивних робіт, прямо впливає на зниження загальних витрат на оплату праці. Крім того, унікальна точність друку зменшує необхідність у повторних роботах, також економить кошти. Вартість робіт може варіюватися залежно від регіону, кваліфікації працівників і складності проєкту, тому її ретельний розрахунок — важливий етап у плануванні бюджету.

Вартість робіт включає оплату операторів 3D-принтера, монтажників, оздоблювальників. Формула для приблизної оцінки:

$$C_{\text{роб}} = T_{\text{буд}} * R_{\text{роб}}$$

де:

- $T_{\text{буд}}$ — тривалість будівництва (дні);
- $R_{\text{роб}}$ — середня добова зарплата робітника або ставка за день (грн/день).

Для 3D-друку тривалість будівництва суттєво менша, ніж традиційними методами, що впливає на зниження цієї складової.

4. Амортизація та експлуатація обладнання

3D-принтер — це високотехнологічне обладнання, яке потребує значних капіталовкладень. Амортизація — це розподіл вартості принтера на весь період його експлуатації, що дозволяє врахувати витрати на використання обладнання при розрахунку вартості кожного будинку. Чим більша кількість надрукованих будівель, тим менше амортизаційні витрати припадають на один об'єкт. Окрім амортизації, потрібно враховувати витрати на технічне обслуговування, ремонт, електроенергію та інші експлуатаційні витрати. Надійність та довговічність обладнання напряду впливають на загальну ефективність процесу, а правильне технічне обслуговування допомагає уникнути простоїв і непередбачених витрат. Планування експлуатаційних витрат і амортизації є ключовим фактором для формування рентабельності проєкту.

Вартість амортизації 3D-принтера та пов'язаного обладнання розраховується як частка вартості обладнання, припадає на будівництво конкретного об'єкта:

$$C_{\text{облад}} = \frac{C_{\text{принтер}}}{N} + C_{\text{обслуг}}$$

де:

- $C_{\text{принтер}}$ — первісна вартість 3D-принтера (грн);
- N — кількість будівель, які планується надрукувати протягом строку експлуатації обладнання;
- $C_{\text{обслуг}}$ — вартість експлуатації та обслуговування за період будівництва.

Наприклад, якщо принтер коштує 5 млн грн, термін експлуатації 10 років, і планується друк 50 будинків, то амортизація на один будинок:

$$C_{\text{аморт}} = \frac{5\,000\,000}{50} = 100\,000 \text{ грн}$$

5. Витрати на логістику

Логістика у будівництві 3D-домів має свої особливості. По-перше, необхідно доставити матеріали (бетонні суміші, армуючі волокна, ізоляційні компоненти) безпосередньо на майданчик, часто в значних обсягах і в короткі терміни. По-друге, сам 3D-принтер — це громіздке обладнання, транспортування якого потребує додаткових ресурсів і узгоджень. Віддаленість будівельного майданчика може суттєво впливати на логістичні витрати, що слід враховувати при плануванні бюджету. Організація ефективної логістики дозволяє не лише оптимізувати витрати, а й забезпечити своєчасність будівництва, особливо важливо при суворих термінах виконання робіт. Висока точність планування логістичних потоків знижує ризик простоїв і зупинок процесу, також позитивно впливає на загальну вартість проєкту.

Транспортування матеріалів і обладнання має значний вплив, особливо при друку будинків у віддалених або складнодоступних місцях. Орієнтовні витрати:

$$C_{\text{лог}} = \sum_{j=1}^m W_j * L_j * P_{\text{трансп}}$$

де:

- W_j — вага матеріалу j (тонни);
- L_j — відстань транспортування (км);
- $P_{\text{трансп}}$ — тариф на перевезення за тонно-кілометр (грн/т·км);
- m — кількість типів матеріалів.

6. Адміністративні та інші витрати

Ця стаття включає витрати на оформлення документації, страхування, податки та інші непередбачені витрати. Зазвичай приймається як певний відсоток від суми інших витрат, наприклад:

$$C_{\text{адм}} = k_{\text{адм}} * (C_{\text{мат}} + C_{\text{роб}} + C_{\text{облад}} + C_{\text{лог}})$$

$k_{\text{адм}}$ — коефіцієнт адміністративних витрат (наприклад, 0,1 або 10%).

7. Загальна формула орієнтовної вартості

Об'єднання всіх складових вартості будівництва в одну формулу дозволяє отримати комплексну оцінку бюджету проекту. Вона враховує матеріали, оплату праці, амортизацію обладнання, логістику і адміністративні витрати, що дає можливість оцінити реальні інвестиції для зведення будинку 3D-друком. Використання такої формули також дозволяє оперативно коригувати бюджет при зміні будь-якого з параметрів — наприклад, вартості матеріалів або тривалості робіт. Це важливо для адаптації до ринкових умов і уникнення непередбачених фінансових втрат. Застосування комплексного підходу у визначенні вартості допомагає підвищити точність планування та інвестиційну привабливість проекту.

Об'єднуючи всі складові, отримуємо:

$$\sum_{i=1}^n = V_i P_i + T_{\text{буд}} R_{\text{роб}} + \frac{C_{\text{принтер}}}{N} + C_{\text{обслуг}} + \sum_{j=1}^m W_j L_j P_{\text{трансп}} + k_{\text{адм}} *$$

$$* \left(\sum_{i=1}^n V_i P_i + T_{\text{буд}} R_{\text{роб}} + \frac{C_{\text{принтер}}}{N} + C_{\text{обслуг}} + \sum_{j=1}^m W_j L_j P_{\text{трансп}} \right)$$

8. Порівняння з традиційними методами

Використання 3D-друку в будівництві демонструє значні переваги перед традиційними методами, особливо у вартості та термінах реалізації. Автоматизація процесу дозволяє зменшити вплив людського фактора, скорочує трудовитрати та знижує ймовірність помилок. Крім того, 3D-друк мінімізує відходи матеріалів, що суттєво знижує загальні витрати. Тривалість будівництва зменшується у 2-3 рази, веде до швидшого введення будинку в експлуатацію і, відповідно, до економії на тимчасових витратах. Проте, незважаючи на ці переваги, потрібно враховувати високі початкові капіталовкладення в обладнання і навчання персоналу. Аналіз показує, при масштабуванні виробництва технологія 3D-друку стає економічно більш вигідною і перспективною у порівнянні з класичним будівництвом, особливо в умовах дефіциту робочої сили і зростання цін на будівельні матеріали.

3D-друк будинків часто демонструє скорочення вартості на 20-40 % порівняно з традиційним будівництвом, за рахунок:

- Зменшення трудових витрат через автоматизацію процесу;
- Скорочення часу будівництва (іноді в 2-3 рази);
- Мінімізації будівельних відходів і втрат матеріалів;
- Використання оптимізованих сумішей і матеріалів.

Таблиця 16 — Приклад орієнтовного розрахунку для будинку 80 м²

Стаття витрат	Значення	Оцінка вартості (грн)
Матеріали	80 м³ бетону × 2500 грн/м³	200 000
Роботи	30 днів × 1000 грн/день	30 000
Амортизація	5 000 000 грн /	100 000

обладнання	50 будинків	
Логістика	10 тонн × 100 км × 5 грн/т·км	5 000
Адміністративні витрати	10 % від суми	33 500
Загальна вартість		368 500 грн

Орієнтовна вартість будівництва будинку за допомогою 3D-друку є конкурентоспроможною та у багатьох випадках більш вигідною у порівнянні з традиційними методами. Детальний аналіз витрат допомагає обґрунтувати доцільність застосування адитивних технологій у житловому будівництві, що підтверджує актуальність та перспективність обраної теми дипломної роботи.

5.2 Порівняння з традиційним будівництвом

Порівняння 3D-друку у будівництві з традиційними методами є ключовим для розуміння ефективності, перспективності та економічної доцільності застосування нових технологій. Хоча класичне будівництво використовується століттями і має добре відпрацьовані методи, 3D-друк пропонує інноваційні підходи, які кардинально змінюють технологічний процес, знижуючи багато традиційних обмежень.

1. Термін виконання робіт

Однією з найбільш вагомих переваг 3D-друку є значне скорочення часу будівництва. Традиційні методи потребують тривалих циклів — від заливки фундаменту, кладки стін, їх висихання, до оздоблення, може тривати місяці або навіть роки. 3D-принтер дозволяє друкувати основні конструктивні елементи будинку цілодобово і безперервно, що скорочує час зведення стін до кількох днів чи тижнів. Це пов'язано з автоматизацією процесу, відсутністю необхідності у великій кількості робітників і можливістю працювати у будь-яких погодних умовах.

2. Вартість будівництва

При порівнянні вартості традиційного і 3D-будівництва важливо враховувати всі статті витрат. Традиційні методи потребують значних затрат на оплату праці, транспорт матеріалів, втрати сировини, а також великий обсяг часу, що також перекладається у додаткові витрати. 3D-друк, навпаки, суттєво зменшує витрати на робочу силу, оскільки більшість процесу автоматизована. Окрім цього, знижуються втрати матеріалів, адже принтер накладає їх із високою точністю. Хоча початкові інвестиції в 3D-принтер та спеціалізовані матеріали є значними, загальна вартість проектів у перспективі виходить нижчою через зменшення операційних витрат і скорочення часу будівництва.

3. Якість та точність

3D-друк забезпечує високу точність виконання конструктивних елементів, що є складним завданням при традиційних методах. Технологія дозволяє створювати складні геометричні форми, які важко або дорого відтворити вручну, при цьому мінімізуючи помилки, можуть виникати під час кладки чи монтажу. В результаті будівлі мають більш рівні поверхні, кращу герметичність і меншу кількість дефектів, сприяє підвищенню якості житла і довговічності конструкцій.

4. Екологічність

Технологія 3D-друку має потенціал бути більш екологічно безпечною порівняно з традиційним будівництвом. Зменшення обсягів відходів будівельних матеріалів, можливість використання екологічно чистих або перероблених матеріалів, а також менше енергоспоживання під час зведення конструкцій – це вагомі аргументи на користь 3D-технологій. Традиційні методи часто пов'язані із значними викидами пилу, відходами та забрудненням навколишнього середовища.

5. Гнучкість у дизайні

Традиційні будівельні технології часто обмежені стандартними формами і матеріалами, що впливає на архітектурні можливості. 3D-друк відкриває широкі можливості для інноваційного дизайну,

складних архітектурних форм, а також індивідуалізації проєктів. Завдяки цифровому моделюванню можна легко змінювати параметри проєкту без суттєвого збільшення вартості чи часу.

6. Трудові ресурси

Традиційне будівництво вимагає великої кількості кваліфікованих працівників, часто є проблемою через нестачу робочої сили. 3D-друк дозволяє значно зменшити людський фактор, знизити фізичне навантаження на працівників та покращити безпеку на будівельному майданчику. Однак цей аспект вимагає нових навичок – фахівці мають знати принципи роботи з принтерами, програмне забезпечення для моделювання та обслуговування обладнання.

7. Обмеження та виклики

Незважаючи на переваги, 3D-друк має й обмеження, які ще потрібно долати. Обмежена кількість матеріалів, які можна використовувати, залежність від технологічної бази, обмежені розміри принтерів, а також питання нормативного регулювання і стандартизації будівництва – це ті фактори, які уповільнюють масове впровадження 3D-друку. Традиційні методи залишаються більш гнучкими в умовах нестандартних проєктів або складних ландшафтів.

Порівняння традиційних методів будівництва з технологією 3D-друку демонструє, що остання є перспективною і здатною вирішити ряд проблем, пов'язаних із сучасним будівельним сектором. Вона дозволяє скоротити час і вартість зведення будинків, підвищити якість і знизити негативний вплив на довкілля. Проте для повсюдного впровадження необхідно подолати технічні та нормативні бар'єри, а також підвищити доступність обладнання і матеріалів. Загалом, 3D-друк має всі шанси стати революційною технологією в будівництві найближчих десятиліть.

(Тут можна вставити порівняльну таблицю основних параметрів 3D-друку та традиційного будівництва)

5.3 Потенціал економії ресурсів та часу

Впровадження технології 3D-друку у будівництві відкриває широкі можливості для значної економії як матеріальних ресурсів, так і часу, є надзвичайно важливими чинниками для сучасної будівельної галузі. Ефективне використання ресурсів та скорочення тривалості будівельних робіт безпосередньо впливає на зниження загальних витрат, підвищення конкурентоспроможності проектів і сприяє більш сталому розвитку будівництва загалом. Однією з найбільш вагомих переваг 3D-друку є точність і контроль процесу нанесення матеріалу. На відміну від традиційних методів, де можливі надлишкові витрати матеріалів через помилки кладки, обрізки або відходи, 3D-принтер «друкує» конструкцію послойно, строго за цифровою моделлю, що мінімізує відходи. Завдяки цьому суттєво знижується кількість необхідного будівельного матеріалу — бетонної суміші, композитів чи інших речовин — не лише економить кошти, але й зменшує негативний вплив на навколишнє середовище.

Крім цього, 3D-друк дозволяє використовувати інноваційні матеріали з додаванням армуючих волокон, підвищують міцність конструкцій без збільшення їх ваги чи об'єму. Це також сприяє зменшенню витрат на фундамент, оскільки легші, але міцніші конструкції не потребують посиленних опор. Відтак економія ресурсів має комплексний характер, охоплюючи не лише матеріали для друку, а й суміжні статті витрат.

Ще одним суттєвим фактором економії є значне скорочення часу будівництва. Традиційні методи зведення будинків пов'язані з великою кількістю ручної праці, етапами висихання матеріалів, тривалими циклами монтажу, які можуть розтягуватися на місяці. У випадку з 3D-друком основні конструктивні елементи будівлі можна надрукувати за лічені дні, а весь будинок — за кілька тижнів, залежно від складності проєкту. Це можливо завдяки безперервній роботі принтерів у будь-яку пору доби, відсутності людських помилок і автоматизації процесів. Таким чином, 3D-друк забезпечує не лише швидкість, а й стабільність якості в процесі будівництва.

Ще один аспект, який пов'язаний із економією часу, — це зниження потреби у великій кількості робочої сили. Втрата кваліфікованих будівельників і збільшення вартості робочої сили в останні роки

стали суттєвими проблемами для галузі. Застосування 3D-друку значно знижує необхідність залучення численних робітників на будмайданчик, оскільки основний обсяг роботи виконує обладнання. Це не лише зменшує витрати на оплату праці, а й підвищує безпеку, оскільки знижує ризик травматизму на будівництві. Однак при цьому зростає потреба у фахівцях, які володіють навичками роботи з програмним забезпеченням для моделювання та обслуговування 3D-принтерів, що відкриває нові можливості для ринку праці.

Оптимізація логістики також є важливим чинником економії ресурсів. Завдяки точним розрахункам необхідної кількості матеріалів і можливості їх дозування безпосередньо на майданчику зменшуються витрати на транспортування і зберігання. Відсутність надлишкових запасів дозволяє уникнути простоїв у роботі через нестачу матеріалів, а також знижує ризик пошкоджень і втрат. Всі ці фактори позитивно впливають на загальну продуктивність будівельного процесу.

Ще одна важлива перевага — це зниження енергоспоживання. Традиційне будівництво характеризується значними затратами енергії не лише на виробництво і транспортування матеріалів, а й на самі будівельні роботи. 3D-друк, як правило, використовує електричну енергію більш ефективно завдяки автоматизації і оптимізації процесів, дозволяє зменшити екологічний слід і знизити витрати на енергоносії.

У підсумку, технологія 3D-друку в будівництві має величезний потенціал для значної економії ресурсів і часу, що є особливо важливим в умовах зростаючого попиту на швидке і якісне житло, зростаючих цін на будівельні матеріали та обмежених трудових ресурсів. Висока точність і контроль процесу, автоматизація, скорочення людського фактора, оптимізація логістики та енергоефективність роблять цю технологію привабливою альтернативою традиційному будівництву, відкриває нові можливості для розвитку будівельної галузі в майбутньому.

5.4 SWOT-аналіз впровадження 3D-друку в Україні

Впровадження технології 3D-друку у будівництві в Україні має значний потенціал, однак супроводжується як сильними сторонами та можливостями, так і певними слабкостями й загрозами. Проведення SWOT-аналізу дозволяє систематизувати ці фактори та визначити стратегії для успішної інтеграції технології у будівельну галузь країни.

Сильні сторони (Strengths)

- Інноваційність технології: 3D-друк є сучасним та перспективним рішенням, що дозволяє автоматизувати будівельні процеси, підвищити точність виконання робіт та скоротити час будівництва.
- Економія матеріалів і часу: Завдяки високій точності нанесення матеріалу технологія дозволяє значно зменшити будівельні відходи та скоротити терміни зведення об'єктів.
- Зниження залежності від робочої сили: Автоматизація процесів знижує потребу у великій кількості кваліфікованих працівників, що особливо актуально в умовах дефіциту кадрів.
- Потенціал екологічності: Зниження використання ресурсів і енерговитрат робить технологію більш дружньою до навколишнього середовища у порівнянні з традиційним будівництвом.

Слабкі сторони (Weaknesses)

- Висока вартість обладнання: Початкові інвестиції у 3D-принтери для будівництва та їх обслуговування є значними, що може стримувати впровадження технології.
- Обмеженість технології: На сьогодні 3D-друк здебільшого підходить для будівництва невеликих або середніх житлових об'єктів, а також елементів конструкцій, обмежує її універсальність.

- Відсутність розвиненої нормативної бази: В Україні поки що недостатньо регламентів і стандартів, ускладнює застосування нових технологій у будівництві.
- Низький рівень обізнаності: Багато будівельних компаній і потенційних замовників ще не мають достатньої інформації про переваги і особливості 3D-друку.

Можливості (Opportunities)

- Залучення інвестицій: Розвиток 3D-друку може привернути увагу інвесторів, зацікавлених у впровадженні інновацій у будівельну сферу.
- Розвиток стартапів та інноваційних компаній: Поява нових підприємств, що спеціалізуються на 3D-друку, може стимулювати розвиток технології і створення нових робочих місць.
- Підвищення екологічної свідомості: Зростання інтересу до екологічно чистих технологій відкриває можливості для популяризації 3D-друку як екологічно безпечної альтернативи.
- Підтримка держави: Можливість отримання грантів, субсидій та інших форм підтримки інноваційних проєктів у будівництві.

Загрози (Threats)

- Складність адаптації законодавства: Повільне оновлення нормативних документів може стати перешкодою для широкого впровадження технології.
- Конкуренція з традиційними методами: Суперечність інтересів традиційних будівельних компаній і новаторських технологій може уповільнити процес прийняття 3D-друку.

- Технічні ризики: Непередбачувані збої обладнання або помилки у проектуванні можуть призвести до додаткових витрат і проблем із якістю.
- Обмежений ринок збуту: Через низьку обізнаність і консерватизм замовників попит на 3D-друк поки що залишається обмеженим.

Висновок

SWOT-аналіз показує, впровадження 3D-друку у будівництві в Україні має великі перспективи завдяки інноваційності, економічності та екологічності технології. Однак для успішного розвитку необхідно подолати проблеми високої вартості обладнання, недосконалості нормативної бази та низького рівня обізнаності серед учасників ринку. Важливим є активна державна підтримка, освіта і популяризація технології серед будівельних компаній і потенційних клієнтів. Лише за таких умов 3D-друк може стати суттєвим драйвером модернізації будівельної галузі в Україні.

SWOT-Аналіз впровадження технології 3D-друку в будівництві в Україні

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
Висока швидкість будівництва	Висока вартість обладнання на старті
Зменшення витрат на робочу силу	Недостатня кількість кваліфікованих спеціалістів
Мінімізація відходів та точне дозування матеріалів	Невизначеність з нормативною базою та законодавчим регулюванням
Можливість друку складних архітектурних форм без додаткових витрат	Обмежена кількість сертифікованих будівельних матеріалів
Зниження впливу людського фактора на якість будівництва	Необхідність адаптації існуючих будівельних стандартів

Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
Попит на доступне житло в Україні та світі	Конкуренція з боку традиційних будівельних компаній
Сприяння «зеленим» технологіям і сталому розвитку	Висока залежність від імпортного обладнання та компонентів
Розвиток державних програм підтримки інновацій	Економічна та політична нестабільність у країні
Удосконалення технологій і зниження вартості принтерів	Ризики пов'язані з технічними збоями чи браком обслуговування
Можливість створення нових освітніх напрямів і підготовки кадрів	Недовіра з боку споживачів до якості 3D-друкованих будинків

6.1 Можливі ризики при експлуатації 3D-друкарських систем

Впровадження 3D-друку у будівництві відкриває нові перспективи, але водночас пов'язане з певними ризиками, які потрібно ретельно враховувати для забезпечення безпеки праці та охорони здоров'я. Експлуатація 3D-друкарських систем, особливо у будівельній сфері, відрізняється специфікою, пов'язаною з великими розмірами обладнання, особливостями матеріалів і автоматизованими процесами, що формує низку потенційних загроз для персоналу та навколишнього середовища.

1. Механічні ризики

3D-принтери для будівництва — це великогабаритне обладнання з рухомими частинами, працюють під високим тиском і з великими швидкостями. Існує ризик травматизму через випадковий контакт з рухомими механізмами, затискання або падіння важких деталей. Для уникнення таких ситуацій необхідно забезпечити встановлення захисних огорожень, обмежувачів руху та впровадити системи аварійного вимкнення. Важливим є також навчання персоналу з правил безпечної роботи з технікою.

2. Ризики, пов'язані з матеріалами

Для 3D-друку в будівництві використовують спеціальні бетонні суміші, композити, полімери та інші матеріали, що можуть містити хімічні добавки і компоненти з потенційною токсичністю. Пил і випаровування під час друку можуть спричиняти подразнення дихальних шляхів, алергічні реакції або інші негативні наслідки для здоров'я. Тому важливим є організація вентиляції робочих приміщень, використання засобів індивідуального захисту (респіратори, рукавички, захисні окуляри) і регулярний контроль рівня шкідливих речовин у повітрі.

3. Електричні ризики

3D-принтери працюють від електричної мережі високої потужності, створює ризики ураження електричним струмом при неправильній експлуатації або несправності обладнання. Для мінімізації цих ризиків необхідно регулярно проводити технічне обслуговування, перевірку ізоляції, заземлення та впроваджувати заходи захисту від коротких замикань і перенапруг.

4. Пожежна безпека

Через використання електроніки і нагрівальних елементів, а також роботу з горючими речовинами, існує загроза виникнення пожежі. Важливо забезпечити наявність систем пожежогасіння, навчити персонал діям у випадку пожежі та проводити регулярні інструктажі з пожежної безпеки.

5. Психофізіологічні ризики

Довготривала робота з автоматизованими системами, потреба в концентрації уваги при контролі процесу, а також можливий монотонний характер праці можуть призводити до перевтоми, стресу і зниження працездатності. Важливим є організація правильного режиму праці та відпочинку, створення комфортних умов на робочому місці.

6. Ризики, пов'язані з помилками проектування та експлуатації

Неправильне проектування цифрових моделей або збої у програмному забезпеченні можуть призвести до дефектів у конструкціях, ставить під загрозу безпеку експлуатації будівельних об'єктів. Необхідна суворі перевірка проектів, тестування і валідація моделей перед друком, а також впровадження систем контролю якості на всіх етапах.

Висновок

Для забезпечення безпечної експлуатації 3D-друкарських систем у будівництві необхідно комплексно підходити до аналізу і мінімізації ризиків, пов'язаних з механічними факторами, матеріалами, електробезпекою, пожежною безпекою та організацією робочого процесу. Ретельне дотримання норм охорони праці, регулярне навчання персоналу, впровадження сучасних систем контролю і захисту дозволять знизити ймовірність аварій і забезпечити ефективну і безпечну роботу обладнання.

Таблиця — Основні ризики при експлуатації будівельного 3D-принтера та заходи запобігання

Категорія ризику	Можливий ризик	Причина	Наслідки	Заходи запобігання
Механічний ризик	Травми від рухомих частин принтера	Відсутність або несправність захисних кожухів	Пошкодження кінцівок, травми	Захисні огороження, чітке зонування, аварійне відключення
Електричний ризик	Ураження електричним струмом	Недостатня ізоляція, волога, несправне обладнання	Електротравми, пожежі	Регулярна перевірка, заземлення, використання сертифікованих пристроїв
Хімічний ризик	Вдихання токсичних парів, контакт зі шкірою	Використання полімерів, смол, добавок	Отруєння, алергічні реакції	Використання респіраторів, рукавичок, витяжних систем
Тепловий ризик	Опіки при контакті з нагрівальними елементами	Високі температури під час друку	Опіки	Ізоляція небезпечних зон, термозахист, попереджувальні знаки
Ризик обвалення	Падіння частин незатверділого	Погана якість суміші або	Травми, пошкодження	Контроль міцності матеріалу, точне

конструкції	будинку або підтримувальної системи	похибка при проектуванні	ення устаткування	3D-моделювання, використання тимчасових підпірок
Програмні помилки	Збій у програмному забезпеченні, помилки друку	Неправильне моделювання або кодування	Пошкодження конструкції, зупинка роботи	Перевірка G-коду, емуляція перед друком, резервне копіювання
Пожежна небезпека	Займання матеріалів або електрообладнання	Перегрів, коротке замикання	Пожежа, руйнування об'єкту	Вогнегасники, температурні датчики, протипожежна сигналізація

7. Висновки

У даній кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження інноваційної технології будівельного 3D-друку, її практичної реалізації на прикладі принтера типу AMT-6044 Long, а також технічного удосконалення одного з ключових його вузлів — друкуючої головки. У межах дослідження було опрацьовано широкий спектр питань: від історії розвитку 3D-друку в архітектурі й будівництві — до аналізу сучасних матеріалів, технологічних рішень, економічної доцільності та забезпечення безпечної експлуатації.

У вступній частині обґрунтовано актуальність теми в контексті сучасних викликів у будівельній галузі, зокрема необхідності швидкого відновлення житла, зменшення екологічного навантаження, підвищення ефективності праці та оптимізації ресурсів. 3D-друк виявився інноваційним підходом, що дозволяє вирішити значну частину цих проблем за рахунок автоматизації, точності, швидкості та гнучкості технологічного процесу. Об'єктом дослідження обрано саме технологію 3D-друку в будівництві, а предметом — її практичну реалізацію через удосконалення друкуючої головки.

У теоретичній частині роботи було детально проаналізовано сучасний стан розвитку 3D-друку в будівництві як у світовому, так і в українському контексті. Наведено приклади реалізованих проєктів, охарактеризовано основні технології друку: екструзійну, сегментну, роботизовану та інші.

Також досліджено переваги і недоліки адитивного способу виготовлення будівель у порівнянні з традиційними методами. Окрему увагу приділено будівельним матеріалам, що використовуються в 3D-друці, їх властивостям, вимогам та перспективам розвитку. Усі ці дані створили ґрунтовну базу для подальших прикладних розробок.

Основною частиною дипломної роботи стала розробка та технічне обґрунтування удосконаленої друкуючої головки будівельного 3D-принтера (розділи 4.1–4.7). У цьому розділі виявлено головні недоліки базової конструкції, які обмежували ефективність роботи принтера: надлишкове накопичення залишків суміші, недостатня точність формування шару, обмеження в масштабуванні, складність обслуговування.

В результаті аналізу та проєктування була розроблена нова конструкція головки, яка передбачає:

- модульність конструктивних елементів, що дозволяє легко адаптувати систему до різних матеріалів і розмірів об'єктів;
- використання шнека зі змінною геометрією для оптимального перемішування суміші;
- впровадження електронної системи контролю та регулювання подачі компонентів;
- використання легких, корозійностійких матеріалів для зменшення навантаження на приводи;
- інтеграцію самоочисного механізму, що скорочує час на обслуговування між друками.

Модернізована друкуюча головка дозволяє підвищити точність нанесення матеріалу, зменшити втрати суміші, забезпечити рівномірність шару, а також пришвидшити весь процес друку без втрати якості. Важливо й те, що конструкція дає змогу легко масштабувати рішення для різних форматів будівництва — від малих архітектурних форм до повноцінних житлових будинків.

У п'ятому розділі наведено техніко-економічне обґрунтування, в якому продемонстровано, що модернізація не лише покращує технічні характеристики принтера, а й має пряму економічну вигоду. Завдяки автоматизації, зниженню витрат на обслуговування і підвищенню продуктивності, загальні витрати на зведення об'єктів зменшуються. Було проведено порівняння з традиційними методами будівництва, що показало перевагу вдосконаленої системи як за вартістю, так і за термінами реалізації.

У розділі шостому проаналізовано аспекти безпеки та охорони праці, які набувають особливого значення при використанні автоматизованих систем. Виявлено, що модернізована друкуюча головка зменшує потребу в прямому контакті оператора з рухомими або потенційно небезпечними вузлами, що підвищує загальний рівень безпеки. Описано потенційні ризики при експлуатації, розроблено заходи профілактики та запропоновано рекомендації щодо організації безпечного робочого середовища.

Загалом, дипломна робота показала, що удосконалення окремого вузла — у цьому випадку друкуючої головки — може мати значний мультиплікативний ефект для всього технологічного процесу 3D-друку в будівництві. Результати дослідження мають прикладну цінність і можуть бути використані для подальших наукових розробок, серійного впровадження обладнання або як база для стартапу в галузі адитивного будівництва.

Список використаної літератури

1. Власюк В.С. 3D-друк у будівництві: інноваційні технології та перспективи розвитку // *Будівництво України*. — 2021. — № 4. — С. 12–17.
2. Monografiya_fynal_polnaya
3. Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G. Developments in Construction-Scale Additive Manufacturing Processes // *Automation in Construction*. — 2012. — Vol. 21. — P. 262–268.

4. Кравчук С.Ю. Впровадження 3D-будівництва в умовах відновлення України // *Архітектурний вісник*. — 2023. — № 2. — С. 34–41.
5. Данилюк О.П., Руденко М.М. Цифрові технології в сучасному архітектурному проєктуванні. — Львів: Видавництво ЛНАМ, 2022. — 178 с.
6. Perkins, I., Skitmore, M. Three-Dimensional Printing in the Construction Industry: A Review // *International Journal of Construction Management*. — 2015. — Vol. 15(1). — P. 1–9.
7. Сидоренко Д.А. Будівельні матеріали для 3D-друку: аналіз і перспективи // *Науково-технічний збірник «Будівельні конструкції»*. — 2021. — Вип. 89. — С. 56–62.
8. Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., Salet, T. Additive Manufacturing in Concrete Construction: Potentials and Challenges // *Cement and Concrete Research*. — 2016. — Vol. 112. — P. 66–75.
9. Глущенко І.М. Технологія будівництва за допомогою 3D-принтерів: навчальний посібник. — Київ: НАУ, 2020. — 152 с.
10. Khoshnevis, B. Automated Construction by Contour Crafting — Related Robotics and Information Technologies // *Automation in Construction*. — 2004. — Vol. 13(1). — P. 5–19.
11. Міністерство розвитку громад та територій України. ДСТУ-Н Б А.3.1-33:2022. Настанова з використання цифрових технологій у будівництві. — Київ: Мінрегіон, 2022. — 36 с.