

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

Дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій

Виконав: студент VI курсу, групи 601-МММ
напряму підготовки (спеціальності)

133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Жила Ігор Валерійович

(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н. проф. Коробко Б.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Панфілов О.І.

(прізвище та ініціали)

Полтава – 2023 рік

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

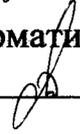
Дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій

Кваліфікаційна робота магістра

Лист затвердження

ГМтаМ .601ММ.004-00.00.000 МР

Технологічний контроль к.т.н., доц.
 О.С. Васильєв
„22” 12 2023р.

Нормативний контроль к.т.н., доц.
 О.С. Васильєв
„22” 12 2023р.

Розробив студент групи 601-ММ
 І.В. Жила
„22” грудня 2023р.

Керівник д.т.н. проф.
 Б.О. Коробко Б.О.
„22” 12 2023р.

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
галузевого машинобудування та мехатроніки
к.т.н., доц.

 О.В. Орисенко

Полтава – 2023 рік

№ рядок.	Форм.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
1					
2			Документація загальна		
3					
4			Вперше розроблена		
5					
6	A4	ГМтаМ.601ММ.004-00.00.000ТЗ	Технічне завдання	1	
7	A4	ГМтаМ.601ММ.004-00.00.000А	Анотація	3	
8					
9	A4	ГМтаМ.601-ММ.004-00.00.000ПЗ	Пояснювальна записка	74	
10					
11			Документація наукова		
12					
13			Вперше розроблена		
14					
15	A4	ГМтаМ.601ММ.004-00.00.000 ПМ	Дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій		
16					
17					
18			Презентаційні матеріали за темою		
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					

					<i>ГМтаМ 601-ММ.004-00.00.000ВМ</i>		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Жила			Лім.	Лист	Листів
Перев.		Коробко		22.12	Н	1	1
Н.контр.		Васильєв		22.12	Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Затв.		Орисенко		19.01			

Дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій
Відомість до кваліфікаційної роботи магістра

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра, циклова комісія Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри будівельних
машин та обладнання


О.В. Орисенко

"04" 09 2023 р.

З А В Д А Н Н Я

до кваліфікаційної роботи магістра

Жили Ігоря Валерійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи

**«Дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних
конструкцій»**

керівник д.т.н. проф. Коробко Б.О.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 04.09.2023 року № 968-сп.д

1. Строк подання студентом роботи 29.12.2023

2. Вихідні дані до роботи Технічні та геометричні характеристики лабораторного 3D принтера. Данні дослідників, параметри будівельних принтерів, результати досліджень.

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Розвиток мобільних технологій 3D -друку в будівництві: інновації та перспективи 2 Проектування та реалізація мобільного будівельного комплексу на основі 3D-принтера 3 Експериментальні дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

«Дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій» графічні матеріали (18 листів А4)

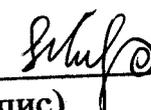
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 02.10..2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<u>Аналіз літературних джерел, розрахунки</u>	15.10.2023	
2	<u>Проектування та реалізація мобільного будівельного комплексу на основі 3D-принтера</u>	15.11.2023 25.11.2023	
3	<u>Конструкторський розрахунок</u>		
4	<u>Компонування пояснювальної записки</u>	15.12.2023	
5	<u>Здача готової роботи</u>		

Студент  І.В.Жила
(підпис) (П.І.Б.)

Керівник роботи  Б.О. Коробко
(підпис) (П.І.Б.)

Анотація

Магістерська робота на тему: «Дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій»

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування – Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2023

Робота складається з трьох розділів.

Роботі проведено дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій. Адитивне виробництво, або 3D-друк, виступає однією з перспективних технологій, яка надає можливість будувати структури та деталі об'єктів шар за шаром, використовуючи цифровий підхід. Ця інноваційна технологія дозволяє не лише прискорити будівельні процеси, але й ефективно використовувати будівельні матеріали, зменшуючи витрати та мінімізуючи відходи.

Останні роки свідчать про стрімкий розвиток 3D-друку в будівельній галузі, де він розглядається як один із ключових компонентів концепції Індустрії 4.0. Впровадження цієї технології може значно поліпшити продуктивність будівельного сектору та сприяти створенню безпечніших умов праці. Глобальна необхідність збільшення обсягів житлового будівництва робить важливим впровадження сучасних методів будівництва, зокрема, використання 3D-друкованих заводських блоків, які можуть відзначатися якістю та ефективністю в порівнянні із традиційними методами.

У цій роботі пропонується активна система для 3D-друку цементних матеріалів на основі екструзії. Систему можна розширити на інші матеріали та масштабувати з невеликими модифікаціями обладнання. Запропонована система

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 А		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат			
Розроб.	Жила		<i>Жила</i>		Лім.	Лист	Листів
Перев.					Н		
Керівн.	Коробко		<i>Коробко</i>	22.12	Анотація		
Н. контр.	Васильєв		<i>Васильєв</i>	22.12			
Затв.	Орисенко		<i>Орисенко</i>	19.01			
					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

використовує нетрадиційний, але простий підхід для забезпечення стійкого виводу матеріалу протягом процесу друку. Ефективність екструдера демонструється через обширний процес друку та тестування різних цементних матеріалів. Параметри друку та матеріалу, які є важливими для отримання об'єктів із високою механічною міцністю, були досліджені та оптимізовані через логічний ітеративний цикл спроб.

Ключові слова: 3D-друк, адитивне виробництво, шнек, екструдер.

					ГМтаМ. 601мММ.004-00.00.000 А	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Annotation

Title: "Investigation of Working Processes of Equipment for 3D Printing of Building Constructions"

Master's thesis for the educational qualification level of Master in the field of 133 Branch Mechanical Engineering at Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University, Poltava, 2023.

The thesis consists of three sections. The research explores the working processes of equipment for 3D printing of building constructions. Additive manufacturing, or 3D printing, emerges as a promising technology that allows the construction of structures and object details layer by layer, employing a digital approach. This innovative technology not only accelerates construction processes but also efficiently utilizes construction materials, reducing costs and minimizing waste.

Recent years witness the rapid development of 3D printing in the construction industry, where it is regarded as a key component of the Industry 4.0 concept. The implementation of this technology can significantly enhance the productivity of the construction sector and contribute to creating safer working conditions. The global need to increase housing construction volumes makes the adoption of modern construction methods, including the use of 3D-printed factory blocks, crucial due to their quality and efficiency compared to traditional methods.

This thesis proposes an active system for 3D printing of cement materials based on extrusion. The system can be expanded to other materials and scaled with minor equipment modifications. The proposed system employs a non-traditional but straightforward approach to ensure a stable material output during the printing process. The extruder's efficiency is demonstrated through an extensive printing process and testing of various cement materials. Print and material parameters crucial for obtaining objects with high mechanical strength have been investigated and optimized through a logical iterative cycle of trials.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, auger, extruder.

					ГМмам. 601МММ.004-00.00.000 А	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

Дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи магістра

ГМтаМ.601ММ.004-00.00.000 ПЗ

Полтава – 2023рік

Зміст

Вступ.....	3
1 Розвиток мобільних технологій 3D -друку в будівництві: інновації та перспективи.....	5
1.1 Огляд технології 3D -друку.....	5
1.2 Особливості екструзійного друку та приклади готових рішень.....	13
1.3 Демонстрації використання технології аддитивного виробництва в будівництві	20
1.4 Соціально-економічні та екологічні впливи 3D друку в будівництві	29
2 Проектування та реалізація мобільного будівельного комплексу на основі 3D-принтера	33
2.1 Опис конструкторської пропозиції	33
2.2 Вибір основних параметрів 3d будівельного принтера.....	36
2.2.1 Підбір конструкції бункера та екструдера 3d будівельного принтера..	36
2.2.2 Підбір конструкції екструдера.....	42
2.2.3 Розрахунок геометрії шнека 3d будівельного принтера та визначення частоти його обертання.....	46
3 Експериментальні дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій.....	57
Висновки	70
Список літератури.....	71
Додатки Презентаційні матеріали за темою «Дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій».....	75

ГМтаМ 601МММ.004-00.00.000 ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат
Розроб.	Жила		<i>Жила</i>	
Перев.	Коробко		<i>Коробко</i>	22.12
Керівник				
Н. контр.	Васильєв		<i>Васильєв</i>	22.12
Затв.	Орисенко		<i>Орисенко</i>	19.01
Зміст				
		Літ.	Лист	Листів
		Н	2	
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»				

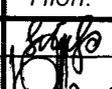
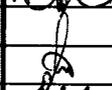
Вступ

Будівельний сектор, завдяки своїй складній природі та різноманітності робіт, залишається однією з галузей, де процеси виконання завдань в значній мірі ґрунтуються на ручній праці. Простота будівельних технік і низький рівень автоматизації призводять до того, що багато операцій виконується вручну, що, у свою чергу, створює умови для великої нестабільності умов праці.

Це стає джерелом численних загроз життю та здоров'ю робітників, а також призводить до збільшення кількості нещасних випадків на будівельних об'єктах. Враховуючи це, в галузі інженерії споруд виникає велика потреба у впровадженні сучасних технологій, спрямованих на автоматизацію та оптимізацію будівельних процесів, а також на підвищення безпеки робочого персоналу.

Адитивне виробництво, або 3D-друк, виступає однією з перспективних технологій, яка надає можливість будувати структури та деталі об'єктів шар за шаром, використовуючи цифровий підхід. Ця інноваційна технологія дозволяє не лише прискорити будівельні процеси, але й ефективно використовувати будівельні матеріали, зменшуючи витрати та мінімізуючи відходи.

Останні роки свідчать про стрімкий розвиток 3D-друку в будівельній галузі, де він розглядається як один із ключових компонентів концепції Індустрії 4.0. Впровадження цієї технології може значно поліпшити продуктивність будівельного сектору та сприяти створенню безпечніших умов праці. Глобальна необхідність збільшення обсягів житлового будівництва робить важливим впровадження сучасних методів будівництва, зокрема, використання 3D-друкованих заводських блоків, які можуть відзначатися якістю та ефективністю в порівнянні із традиційними методами.

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Вступ	Лім.	Лист	Листів
Розроб.	Жила					Н		3
Перев.	Коробко			22.12				
Керівник								
Н. контр.	Васильєв			22.12				
Затв.	Орисенко			19.01				
						Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

У цій роботі пропонується активна система для 3D-друку цементних матеріалів на основі екструзії. Систему можна розширити на інші матеріали та масштабувати з невеликими модифікаціями обладнання. Запропонована система використовує нетрадиційний, але простий підхід для забезпечення стійкого виводу матеріалу протягом процесу друку. Ефективність екструдера демонструється через обширний процес друку та тестування різних цементних матеріалів. Параметри друку та матеріалу, які є важливими для отримання об'єктів із високою механічною міцністю, були досліджені та оптимізовані через логічний ітеративний цикл спроб.

					ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		4

1 Розвиток мобільних технологій 3D -друку в будівництві: інновації та перспективи

1.1 Огляд технології 3D -друку

Багато виробників обладнання для виконання будівельних робіт почали використовувати технології 3d друку.

У міжнародному стандарті ISO/ASTM 52900 визначається як "процес з'єднання матеріалів для виготовлення деталей за допомогою даних 3D-моделі, зазвичай шар за шаром". Це альтернативний метод порівняно з традиційними виробничими процесами, в яких, наприклад, формування в формах або фрезеруванням. Процеси друку можуть бути розділені на сім категорій: екструзія матеріалу, струменеве наплення матеріалу, струменеве наплення з фіксацією, сплавлення порошкового шару, наплення поверхневого шару, фотополімеризація та шарова ламінація. В будівництві найбільшого поширення набула технологія друку за рахунок екструзії матеріалу – суміші.

У даному розділі проведено огляд процесів та систем аддитивного виробництва для будівельної галузі за допомогою технології 3d друку. Також акцентується увага на аспектах, пов'язаних із матеріалами, та конструктивними особливостями екструдерів і зазначаються переваги, такі як можливість швидкого та точного виготовлення складних геометричних форм, а також індивідуалізація будівельних рішень. Також особливе місце займають питання, пов'язані зі стандартизацією, якістю та економічною доцільністю масштабного використання аддитивних технологій у будівництві.

Аддитивне виробництво - це процедура, що формує шари для створення тривимірних (3D) твердих об'єктів з цифрових моделей, що дозволяє творцям, інженерам, архітекторам та дизайнерам створювати індивідуалізовані проекти в

				ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат				
Розроб.	Жила				Розвиток мобільних технологій 3D -друку в будівництві: інновації та перспективи	Лім.	Лист	Листів
Перев.	Коробко			22.12		Н	5	
Керівник						Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Н. контр.	Васильєв			22.12				
Зате.	Орисенко			1901				

одно етапному процесі. Поява передових технологій, разом із вимогами до більш ефективних та екологічних будівництва і тенденцій до майбутніх конструкцій/дизайнів, призводить до змін у масштабах та розподілі будівництва. Підходи, такі як автоматизація процесів, великою мірою відступають від традиційних методів будівництва.

Автоматизацію виробництва в основному досліджено в рамках робототехніки [1–5]. Застосування автоматизованого рішення призведе до покращення продуктивності, якості та контролю якості, умов праці та проблеми з нестачею кваліфікованої робочої сили. Технологія автоматизації впроваджується в будівництво, наприклад, використання технології дронів на будівельних майданчиках досліджується для застосувань, таких як інспекція безпеки [6] та 3D-моделювання майданчика [7]. Автоматизовані рішення зі збирання в будівництві були розроблені незалежно від систем 3D друку, але поєднання обох може розглядатися як рішення для багатофункціональних робототехнічних задач. Наприклад, Williams et al. [2] презентують RoboCrane - автономну систему для аддитивного будівництва будинків за допомогою друку бетоном та подібними матеріалами.

Використання промислового робота з шістьма координатами не лише дозволяє виконувати не прямолінійні розрізи надрукованої конструкції, але також сприяє ефективній реалізації технологій копіювання та масовості виробництва однакових елементів або виробів в будівельній промисловості. Одна з основних технологій друку, розроблених для будівельної галузі, - це Contour Crafting, що представляє собою технологію шарування, яка використовує роботичні руки та екструзійні насадки. Цей процес дозволяє використовувати матеріал, схожий на бетон, для формування стін будівлі за допомогою програмованого крану чи риштування [8]. Ці машини мають систему координат XYZ, комплект насадок із трьома компонентами управління рухом (екструзія, обертання та відхилення кельми) та систему координованого управління рухом із шістьма вісями. Основною особливістю Contour Crafting є

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		6

використання двох кельм, які в основному діють як дві тверді планарні поверхні, для створення гладких і точних поверхонь на виробуваному об'єкті.

Одним із недоліків більшості конструкцій таких принтерів це відсутність мобільності.

Принтер будує будівлю навколо себе, в робочій зоні обладнання, і в подальшому, після завершення друку об'єкта будівництва або виробу потрібно використовувати підйомні та транспортуючі машини для переміщення обладнання на нове місце виконання робіт.

Однак, сучасні дослідження і розробки активно працюють над розв'язанням цієї проблеми. З'являються нові концепції та прототипи мобільних 3D-принтерів, які дозволяють здійснювати будівництво та виробництво в різних місцях без необхідності використання додаткового обладнання для переміщення.

Одним з напрямків розвитку є розробка рухомих робочих комплексів з вбудованим 3D-принтером. Ці комплекси можуть бути оснащені колісними або гусеничними шасі, що дозволяють їм вільно переміщатися по будівельному майданчику чи іншій території. Такі робочі комплекси обладнання можуть самостійно знаходити оптимальні маршрути для будівництва та автоматично налаштовувати своє положення для друку об'єкта.

Ще одним рішенням є розробка портативних 3D-принтерів, які можна легко переносити та використовувати в різних місцях. Ці принтери можуть мати компактні розміри та бути збірними, що дозволяє їх транспортувати у важкодоступні місця або на великі відстані. Такі принтери повинні бути оснащені автоматичною системою навігації, яка допомагає користувачеві зорієнтуватися в просторі та налаштовувати параметри друку.

Крім того, приділяється увага розвитку роботів-конструкторів, які можуть будувати та розбирати споруди. Ці роботи мають здатність виконувати складні конструкційні завдання, включаючи 3D-друк, і забезпечують максимальну мобільність, оскільки їх можна переносити і налаштовувати на різних ділянках будівельного майданчика. Ці роботи-конструктори здатні самостійно

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
						7
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

переміщатися по території, використовуючи свої механізми руху, такі як колеса або гусениці. Вони оснащені потужними датчиками, що дозволяють їм аналізувати навколишнє середовище та здійснювати точні рухи без зіткнень з перешкодами.

Такі мобільні 3D-принтери та роботи-конструктори значно розширюють можливості використання технології 3D-друку в будівництві. Вони дозволяють зменшити залежність від фіксованих станцій та виконати роботи на віддалених або важкодоступних місцях. Крім того, вони сприяють ефективнішому використанню ресурсів та зниженню витрат часу на перенесення обладнання.

Застосування мобільних технологій 3D-друку в будівництві має значний потенціал для швидкого та ефективного виконання різних типів проектів. Вони можуть бути використані для будівництва прототипів, невеликих будівель, архітектурних елементів та інших конструкцій. Завдяки цим технологіям стає можливим швидке реагування на зміни вимог та потреб клієнтів, а також зниження вартості та підвищення якості будівництва.

У майбутньому можна очікувати ще більші інновації в галузі мобільних технологій 3D-друку, що відкриє нові можливості для будівельної індустрії та прискорить процеси будівництва та виробництва.

Незважаючи на прогрес у розвитку мобільних технологій 3D-друку будівельних конструкцій, все ще існує кілька невирішених питань, пов'язаних з цією проблемою.

Розмір та вага обладнання. Мобільні 3D-принтери та роботи-конструктори потребують компактного та легкого дизайну, щоб бути мобільними. Проте, це може обмежувати їхні можливості та потужність. Вирішення цього питання вимагає збалансованого підходу до розміру та функціональності обладнання.

Енергопостачання. Мобільні пристрої потребують стабільного та ефективного джерела енергії. Забезпечення енергопостачання, яке б дозволяло тривалий час працювати без підзарядки або заміни батареї.

Стійкість та точність. Під час руху по нерівній поверхні може виникати проблема стабільності та точності роботи мобільного обладнання. Вирішення цього питання передбачає розробку механізмів компенсації вібрацій, сенсорів для точного позиціонування та алгоритмів управління для підтримки стабільності принтера під час роботи.

Метою роботи є огляд конструкцій будівельних 3D-принтерів для об'ємного друку та аналіз технологій, які найбільш доцільні для їх використання в мобільних умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:
виконати огляд найбільш поширених конструкцій будівельних 3D-принтерів, які забезпечують мобільність та здатність працювати на рухомих платформах;

проаналізувати переваги та недоліки різних конструкцій будівельних 3D-принтерів у контексті їх мобільного застосування;

оцінити їхню маневреність, стабільність та точність друку, а також енергоефективність та надійність;

оцінити можливості різних конструкцій будівельних 3D-принтерів щодо швидкого перенастроювання при зміні програми виробництва;

дослідити, які технічні рішення та функціональні можливості дозволяють швидко змінювати параметри друку та переходити від одного проекту до іншого;

запропонувати концепцію щодо поєднання 3D-принтера з автомобільним шасі та запропонувати можливі варіанти застосування.

Цей дослідницький підхід допоможе визначити найбільш доцільні конструкції будівельних 3D-принтерів для мобільного використання та визначити потенційні напрямки подальшого розвитку технологій 3D-друку в будівельній галузі.

Будівельний 3D-принтер складається з тих конструктивних елементів, що і його аналоги в інших галузях. Він має важливі компоненти, такі як: стріла, що використовується для переміщення принтера по вертикалі та горизонталі;

					ГМтаМ 601МММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		9

екструдер – пристрій, що наносить матеріал шар за шаром, і електроприводи, які керують рухом платформи в заданому напрямку. Розміри будівельного 3D-принтера, зазвичай, визначаються розмірами об'єкта, який будується, і можуть значно варіюватися.

Однак, в будівельній галузі можуть використовуватися спеціалізовані будівельні 3D-принтери, які можуть мати додаткові компоненти або модифікації для забезпечення високої точності, швидкості та ефективності під час будівництва об'єктів.

Це вказує на те, що будівельні 3D-принтери маю загальну структурну концепцію, але можуть бути налаштовані та модифіковані під потреби будівельної галузі та розташовані на мобільних платформах.

Дослідники з Массачусетський технологічний інститут розробили конструкцію 3d будівельного принтера, об'єднали конструкцію принтера з гусеничним рушієм, що дозволило зробити машину більш мобільною та зменшити залучення спеціальної техніки при будівництві (рисунок 1).

Особливістю даного принтера є те, що замість традиційних стін з бетону пропонується друкувати піноізоляційний каркас який в подальшому заповнюватиметься бетонним розчином.

На фото можна спостерігати вже надрукований каркас конструкції будівлі (рисунок 2).

Також відома конструкція принтера від компанії Cazza Construction модель X1 3D Printing (рисунок 3). Мобільний комплекс X1 3D Printing може також самостійно пересуватися до місця будівництва.

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
						10
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

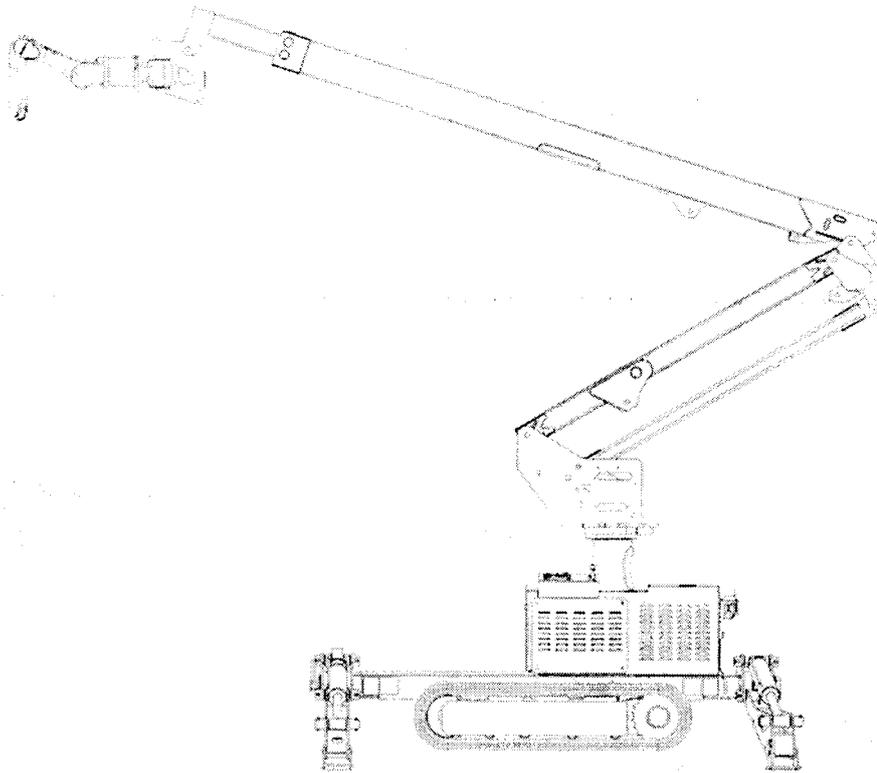


Рисунок 1.1 – Мобільний принтер на гусеничному шасі

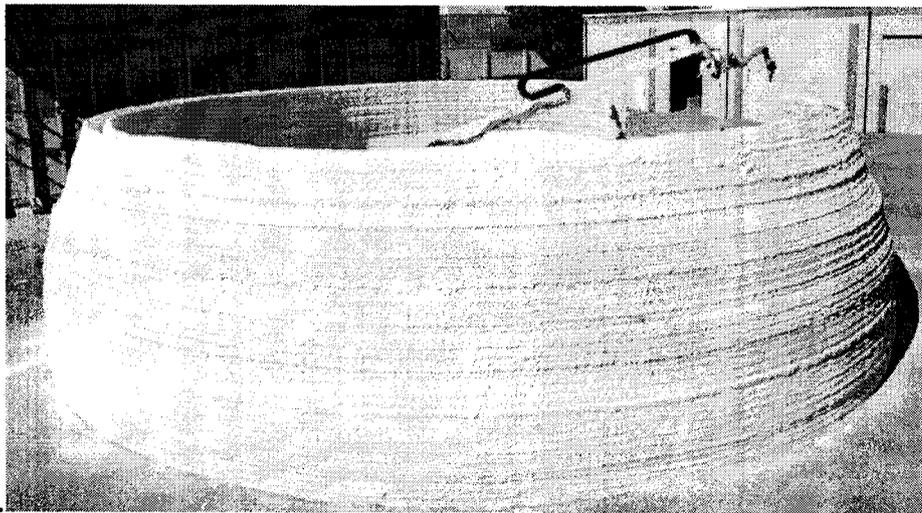


Рисунок 1.2 – Піноізоляційний каркас будівлі



Рисунок 1.3 – Мобільний комплекс X1 3D Printing

Недоліком принтерів на гусеничному шасі є їх мала мобільність між будівельними майданчиками та залучення спецтехніки для транспортування (Рисунок 4)

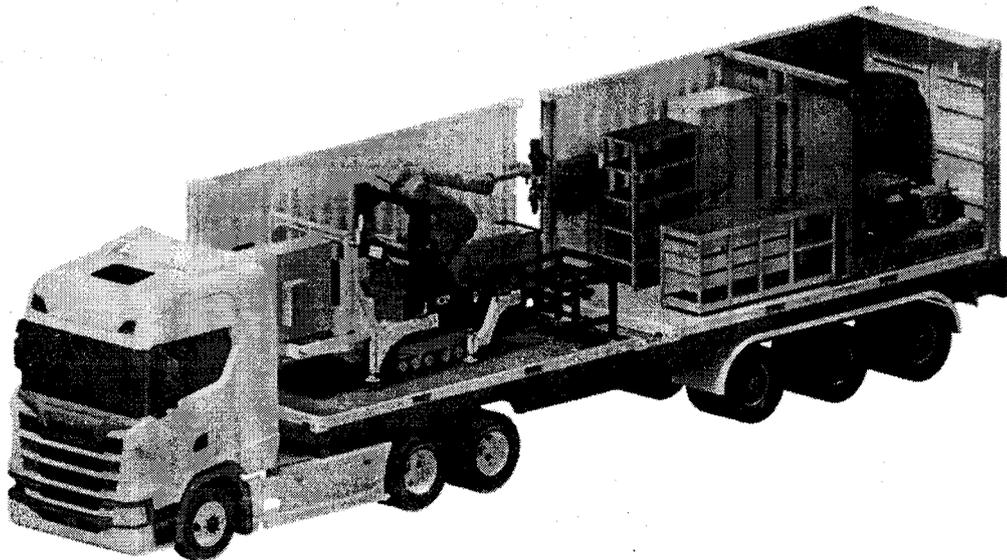


Рисунок 1.4 – Перевезення мобільного 3D Printing

Почали з'являтися конструкції мобільних 3D-принтерів розміщених на базі колісного причепа з використанням роботизованої руки, яка використовується для виконання різних операцій (рисунок 5).

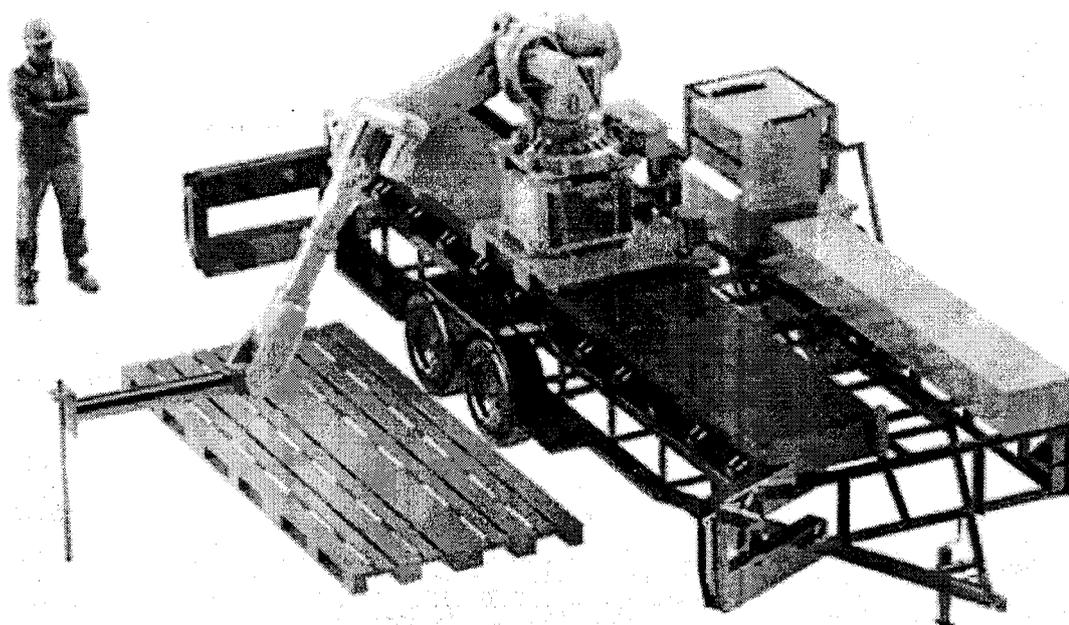


Рисунок 1.5 – Причеп з універсальною роботизованою рукою маніпулятором.

1.2 Особливості екструзійного друку та приклади готових рішень

У процесі екструзійного друку структура створюється шар за шаром за допомогою насоса, який витискає свіжий цементний матеріал вздовж визначеного шляху, як показано на прикладі на рис. 1.6. Для забезпечення високої якості надрукованих компонентів матеріал повинен мати певні характеристики:

- Повинна забезпечуватися можливість подачі свіжої суміші до насоса. Наприклад, у шланзі не повинно відбуватися розділення часток для уникнення засмічення [26–28].
- Бетон повинен проходити через насос і забезпечувати запас суміші, щоб

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		13

структура матеріалу який видавлюється була однорідна без повітряних включень і забезпечувалася форма шару [26,29].

- Новий шар який накладається на вже існуючу поверхню повинен з'єднуватися без напливів та розривів [26,30–35].
- Не повинно відбуватися значна деформація нижніх шарів під вагою верхніх шарів (будівельна здатність) [26,27,29,36–39].



Рисунок 1.6 – Використання процеси адитивного виробництва для створення бетонних структур шар за шаром

Для досягнення цього матеріальні та процесуальні параметри, такі як пропорції суміші, додавання добавок, шлях та швидкість руху друкарської

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист 14
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

головки (екструдера), повинні бути вибрані відповідним чином та взаємно згідно один з одним [26,27,29]. У стані затвердіння добре надрукований бетон може мати подібну міцність та щільність, що і литий бетон [26]. Вимірювання, показані в [30], демонструють, що можна досягти навіть вищої щільності під час друку. Однак в залежності від напрямку навантаження, стискаюча міцність екструдованого бетону може зменшитися на 15% у випадку прямих ліній накладання шарів і до 30% у випадку криволінійних рухів вкладання шарів.

Протягом останніх років було розроблено кілька різних процесів бетонного екструзійного друку. Їх можна розділити на три типи в залежності від розміру шару що вкладається :

- Відкладання тонких шарів менше 1 см в діаметрі. Прикладом такого типу є 3D бетонний друк (3DCP) у Лафборо університеті, для якого використовується 3-осовий робот зі стрілкою [9,].
- Відкладання середньо-тонких філатів з поперечними розмірами до кількох см. До цієї групи відносяться Contour Crafting у Університеті Південної Каліфорнії [8] та 3DCP в Технічному університеті міста Айнсгоуен [10]. У обох випадках друкована головка є частиною 3-осового робота зі стрілкою. Крім того, у Contour Crafting до сопла приєднуються шпателі для досягнення більш гладких та точних поверхонь (рисунок 1.7).
- Відкладання грубих шарів у діапазоні кількох дм. CONPrint3D в Технічному університеті Дрездена відноситься до цієї категорії. Він прагне до широкого використання встановлених стандартів для бетону та існуючого будівельного обладнання.

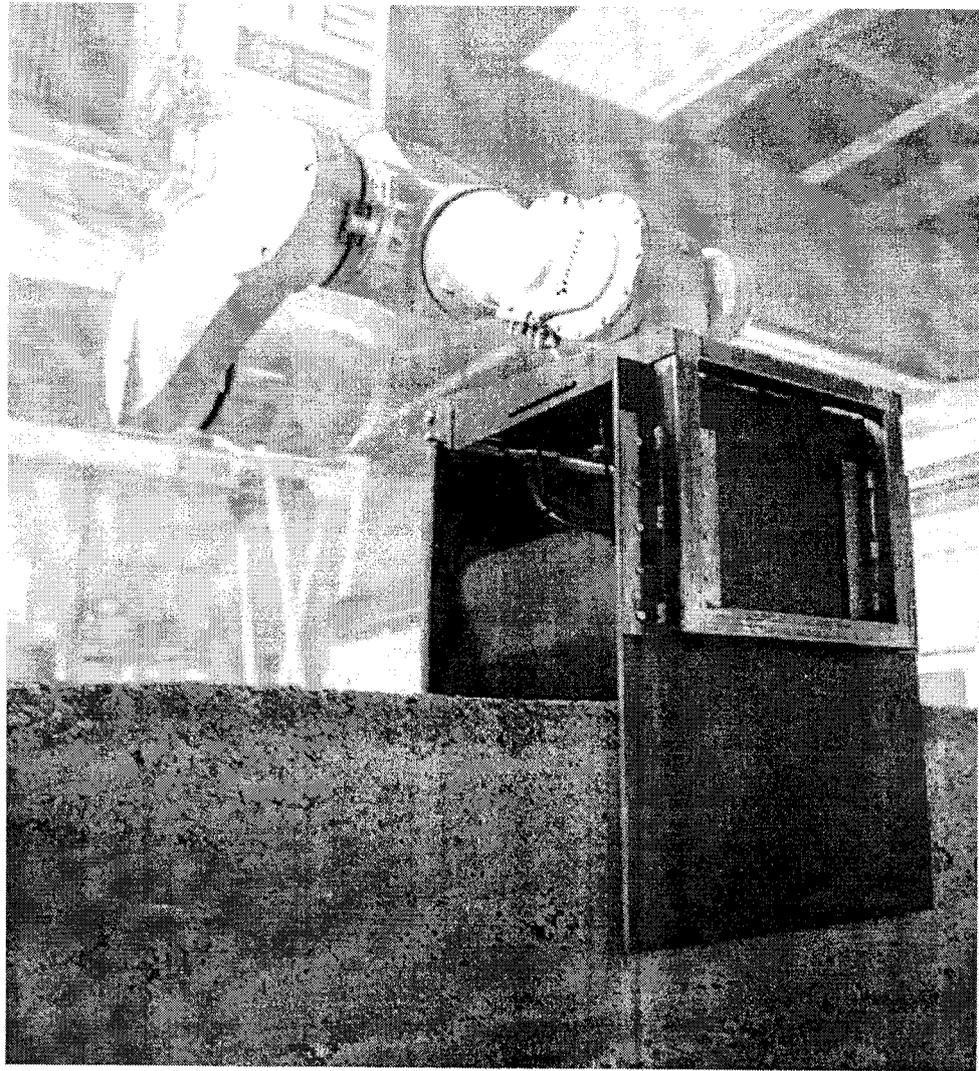


Рисунок 1.7 – Принтер Contour Crafting з шпателями

Основним елементом, який забезпечує надійну роботу принтера є екструдер. Розглянувши можливі варіанти використання різних конструкцій екструдерів, а саме, одинарних (рисунок 1.8) та здвоєних (рисунок 1.9).

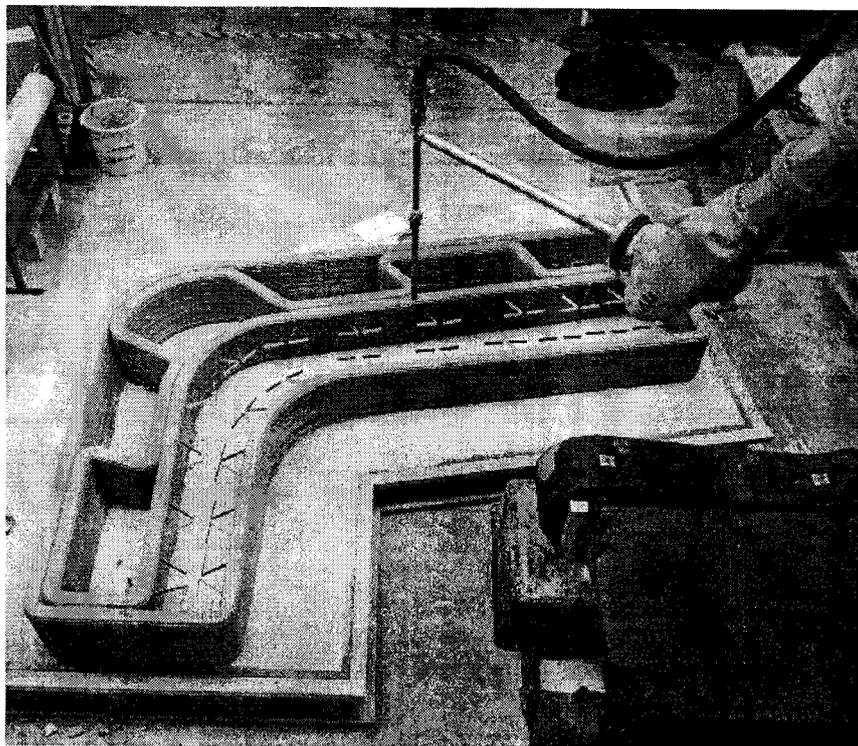


Рисунок 1.8 – Одинарний екструдер

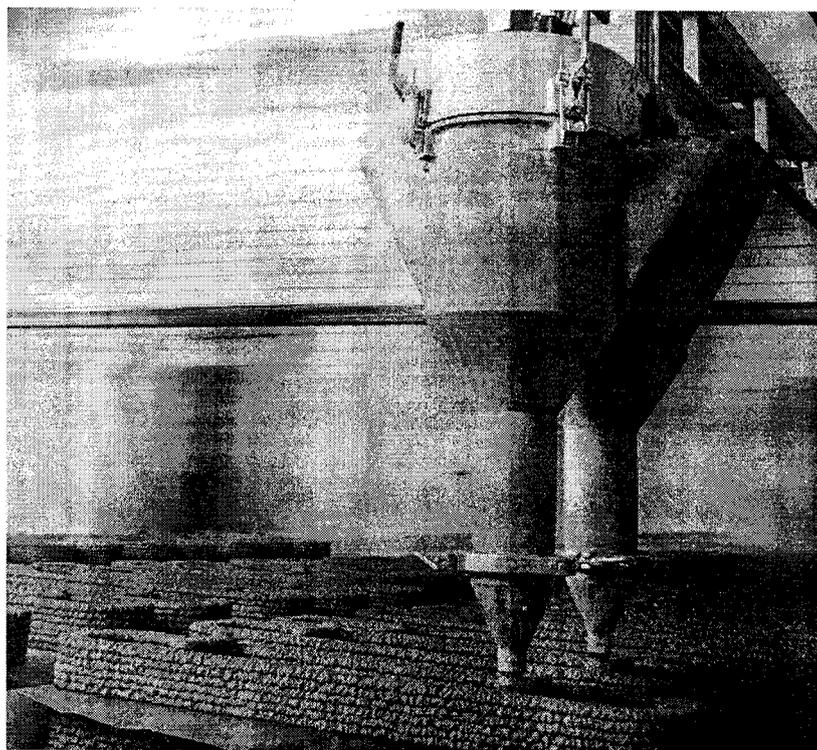
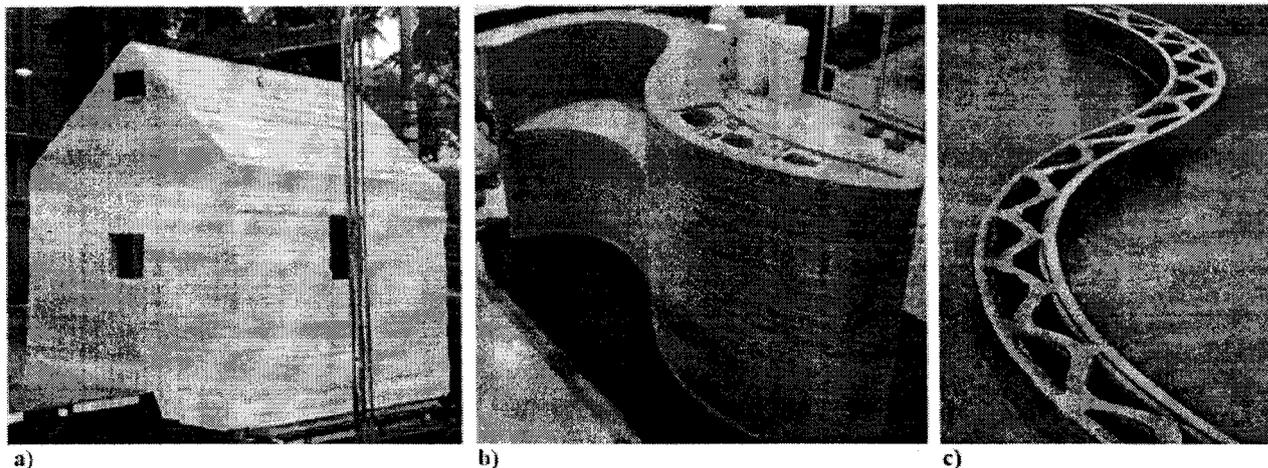


Рисунок 1.9– Здвоєний екструдер

Використання зведеного екструдера майже вдвічі підвищує продуктивність роботи машини, але має недолік – це ускладнення при роботі з різними (криволінійними) траєкторіями руху з одночасною подачею суміші.

Вчні Університету Лафборо [9] також здійснила інші розробки, використовуючи автоматизований екструзійний процес. Розміри друкованих продуктів були обмежені, оскільки вони могли працювати лише з розміром друку до 5,4 м × 4,4 м × 5,4 м [9]. Такі розміри забезпечують достатній простір для друку основних виробів з бетону, таких як колони [10]. Порівняно з Contour Crafting, метод друку бетону має меншу роздільну здатність відкладення (4-6 мм шару), що призводить до більш точного контролю складних геометрій. Також був розроблений процес під назвою D-shape за допомогою напруження в'язу на шар матеріалу. D-shape - це порошковий 3D-принтер на базі фабричного порталного крана, який, за словами його розробників, має ефективний метод друку для об'єктів великого масштабу [11]. Метод D-shape використовує процес нанесення порошку та нанесенням в'язучого рідкого матеріалу. Всі вище перелічені технології демонструють можливість будівництва великих об'єктів (рисунок 1.10).



а) будинок, б) парковий елемент с) криволінійна стіна

Рисунок 1.10 – Приклад великогабаритних об'єктів за допомогою технології D-shape

Техніки екструзійного друку призначені як для застосувань на місці будівництва, так і за його межами, таких як виробництво великогабаритних елементів, тоді як техніка порошкового друку може бути використана як процес за межами будівництва для виробництва передпроекттованих елементів, таких як панелі, постійні опалубки та внутрішні структури, які можна складати на місці [13]. Товщина шару, тобто роздільна здатність друку в усіх трьох методах, протиставляється швидкості виконання, тобто кількості шарів, необхідних для побудови потрібної висоти. Додатковими впливовими факторами є мінімальний розмір деталі (тобто найменший деталь, який можна побудувати) та обробка поверхні [9].

Інновації та дослідження відіграють ключову роль у системних змінах у будівельній галузі 3D друку, де використання технологій з інших галузей матиме багато конкурентних переваг. Технологія аддитивного виробництва (AM) може мати потенціал допомогти будівельній галузі переходити на наступний рівень виконання будівельних робіт таких як зведення стін, проте для цього потрібно розробити різні класи передових сумішей для друку, щоб зробити цю технологію ефективнішою для створення конструктивних елементів будівель.

Загальне уявлення полягає в тому, що друк будівель є найбільш актуальним для галузей, де вимоги до індивідуалізації, гнучкості, складності дизайну та зменшення високих транспортних витрат для доставки готової продукції критичні. Тому будівельна галузь може стати потенційним лідером наступної революції в промисловості, відомої як Індустрія 4.0.

Простий підхід до вдосконаленої конструкції - це процес, який вже довгий час практикується в будівельному секторі, такий як традиційні техніки кладки цегли. Справжнім новаторством передової будівельної технології є поєднання нових високоефективних та сталих матеріалів з передовими інструментами цифрової епохи, використання архітектурного програмного забезпечення та поєднання різних компонентів робототехніки для автоматизації та вдосконалення процесів, які традиційно виконувалися вручну.

					ГМтаМ 601МММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		19

Систематичне тестування є невід'ємною частиною для вдосконалення способу друку в будівельній галузі за допомогою використання передових технологій для підвищення можливості передбачення та адаптації. Однак, разом із тим, важливо враховувати етичні, екологічні та соціальні аспекти впровадження інновацій, забезпечуючи сталість та ефективність розвитку будівельної галузі в цілому.

Демонстрації використання технології аддитивного виробництва в будівництві

За роки існування технолоії друку будівель та конструкцій назбиралась велика кількість відомостей про надруковані об'єкти, які стверджують про різний успіх у використанні цієї технології.

Наприклад, китайська будівельна компанія WinSun виконала 3D-друк десять будинків (рисунок 1.11) всього за 24 години в 2014 році і поставила цим своєрідний рекорд.

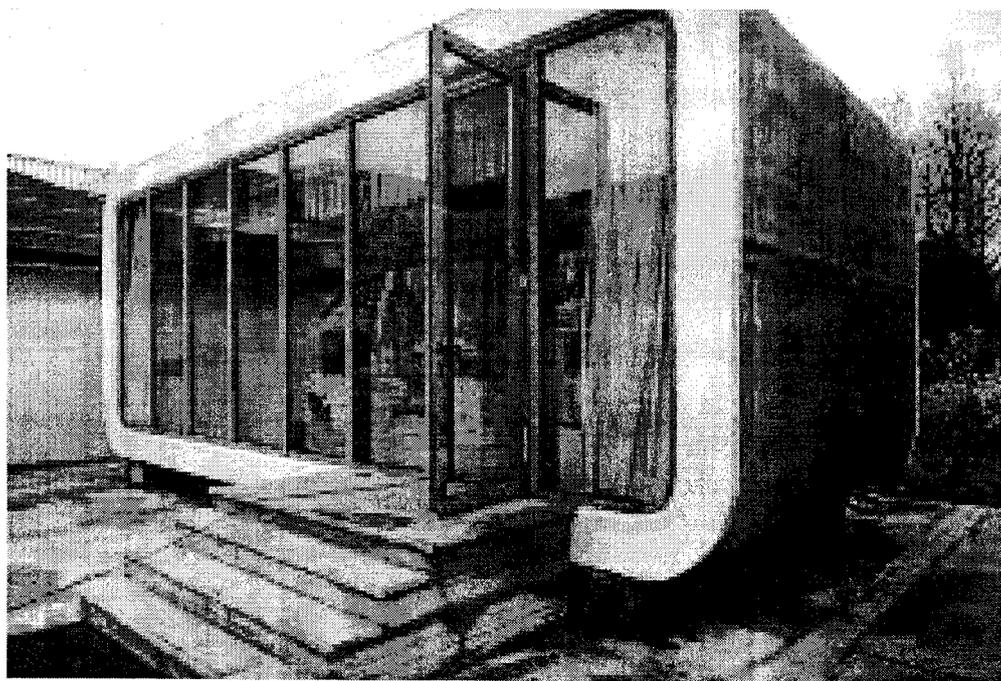


Рисунок 1.11 – 3D-друк десять будинків

Для цього використовувався великоформатний 3D-принтер розміром: 150м завдовжки, 10 м завширшки і 6 м висотою, а також бетонний матеріал, посилений спеціальним скловолокном.

Також у 2016 році WinSun представила перший в світі 3D-надрукований офіс, площа якого становила 250 м² (рисунок 1.12).

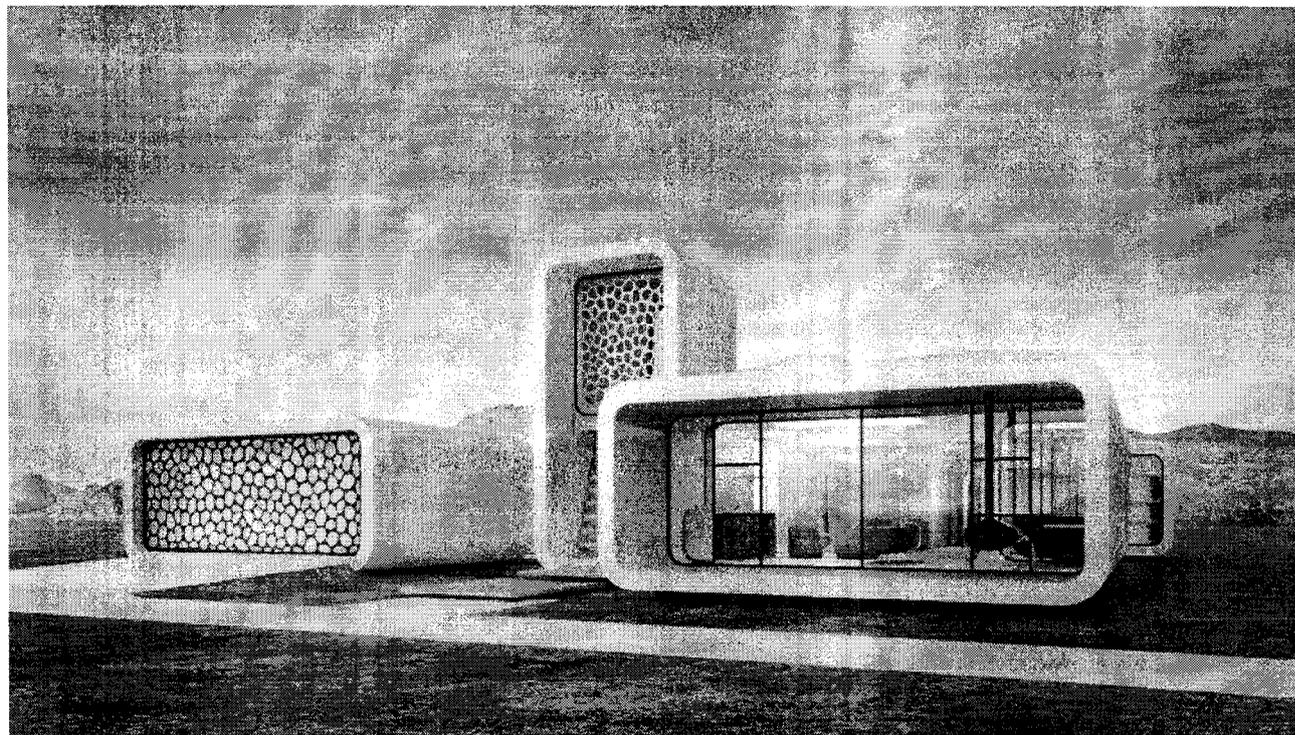


Рисунок 1.12 – Перший в світі 3D-надрукований офіс

Будівля друкувалася за допомогою мобільної системи з автоматизованим роботизованим механізмом. Інтеграція унікального дизайну будівлі та технології 3D-друку продемонструвала потенціал включення та пропозицій заздалегідь розроблених функцій для основних служб в будівлі, таких як вода, електроенергія та кондиціонування повітря. Хоча на вивчення повного обсягу моделі знадобилося 17 днів [21], персонал компанії стверджує, що витрати на робочу силу можна зменшити більш ніж на 50%, порівняно із традиційними будівлями подібного розміру.

У вересні 2015 року інтер'єр готельного номера на Філіппінах розміром $12,5 \times 10,5 \times 4$ метри був надрукований Андрієм Руденко, ставши першою комерційно орієнтованою структурою, створеною за допомогою технології аддитивного виробництва (рисунок 1.13)[28].

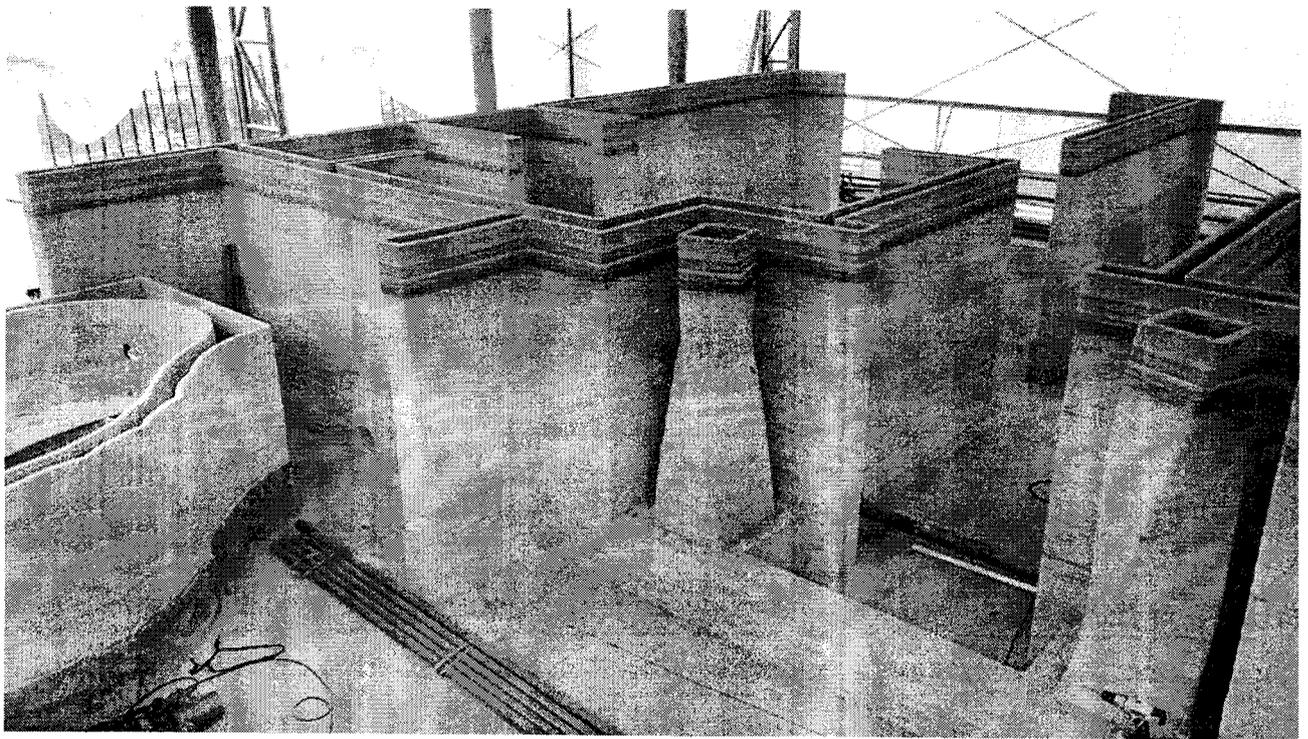


Рисунок 1.13 – Номер готелю на Філіппінах

На рисунку 1.14 показано сопло принтера в дії та завершені структури, які було досягнуто. Завершення проекту зайняло 100 годин друку, хоча процес був неперервним. В якості матеріалів для друку використовували суміш піску та місцевого вулканічного попелу, яка виявилася важкоекструдованою. Незважаючи на відсутність повного кількісного опису, був розроблений надійний процес з міцними стінами та добрим зчепленням між шарами [28].

Будівельні компоненти середнього та великого розміру є важкими та можуть важити до п'яти тонн. Підйом та переміщення цих частин не є простими та економічними. Знаючи це, компанія Apis Cor™ нещодавно надрукувала

будинок, використовуючи мобільну технологію 3D-друку (див. рисунок 1.15) [29].

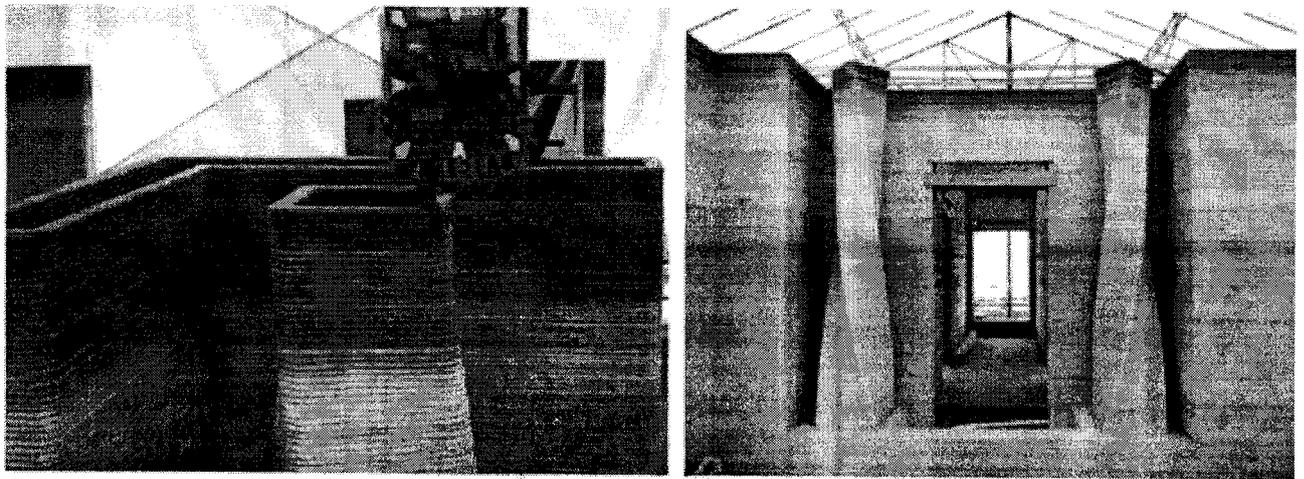


Рисунок 1.14 – Сопло принтера в дії та завершені структури номера

Автоматизований друк самонесучих стін, перегородок та оболонки будівлі був виконаний за 24 години, загальна площа надрукованої будівлі становила 38м². Компанія Aris Cor™ стверджує, що цей принтер легко транспортувати на будь-який будівельний майданчик і не потребує тривалої підготовки перед початком будівельних робіт, використовуючи вбудовану систему автоматичного вирівнювання горизонту та стабілізації.

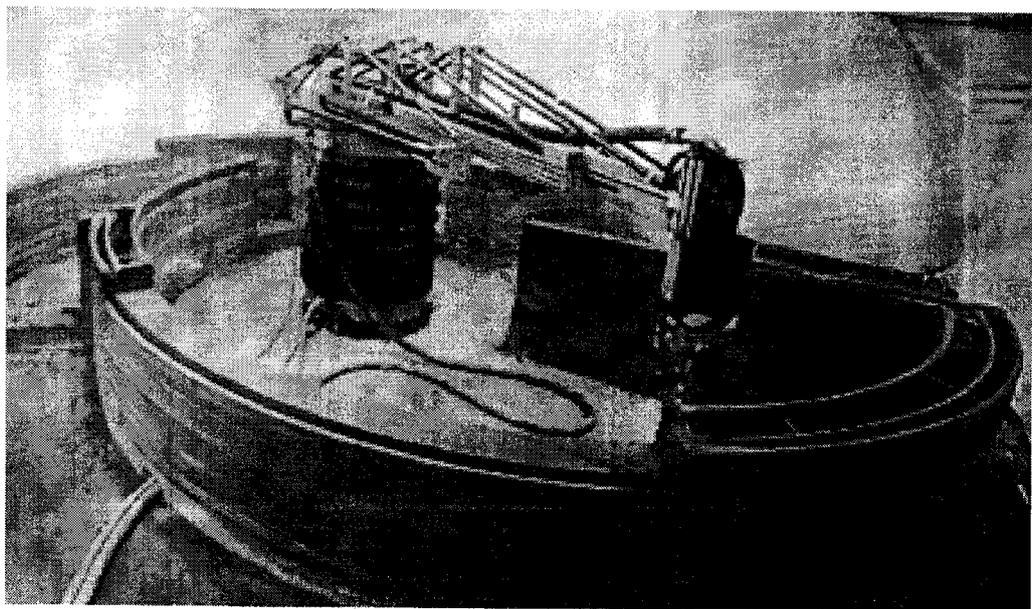


Рисунок 1.15 – Процес друку будинку компанією Aris Cor™

Цей приклад спрямований на демонстрацію того, що метод будівництва на місці (тобто методи Contour Crafting та Apis Cor™) може бути значно простішим та економічнішим, ніж заводські конструкції які в подальшому потрібно доставити на місце будівництва та ще і змонтувати. Окрім обмежень роботизованого механізму та розмірів друку (площа та об'єм), важливим потенційним недоліком також може бути чутливість вихідних матеріалів та самого процесу друку до атмосферних умов, що в певній мірі може ускладнювати застосування принтера на місці.

З урахуванням деяких цих труднощів Gosselin та ін. [14] представили процес аддитивного виробництва для ультрависококоміцного бетону. Запропонований процес 3D-друку базується на методі друку, де матеріал наноситься шар за шаром за допомогою дозатора екструдора, встановленого на 6-осьовому роботичному механізмі. Gosselin та ін. [14] стверджують, що цей процес дозволяє виготовлення 3D-конструкцій складної геометрії великої площини без використання тимчасових опор. Їхнє обладнання включає дозатор друку, встановлений на роботі, і два насоси подачі готових компонентів, один для подачі розчину інший для подачі прискорювача твердіння.

Виготовлення елемента стіни розміром 1,36 м × 1,5 м × 0,17 м зайняло приблизно 12 годин (139 шарів). Зображення остаточної друкованої стіни показано на Рис. 1.16-1.17.

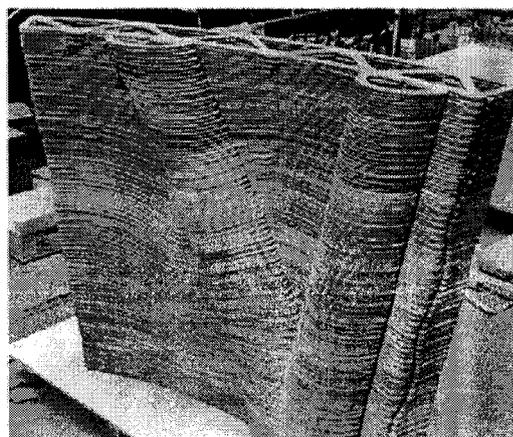


Рисунок 1.16 – Фрагмент стіни

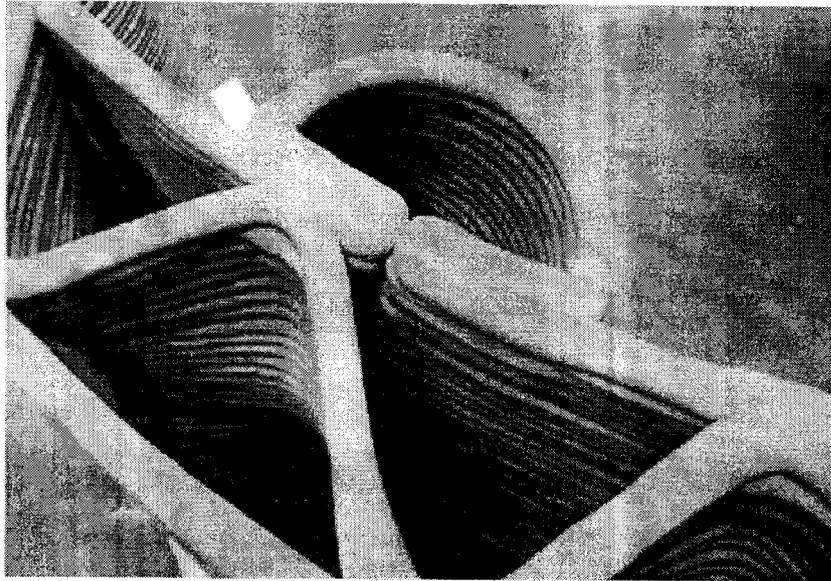


Рисунок 1.17 – Фрагмент стіни з декоративними вставками

В 2020 році Китайська Народна Республіка встановила ще один рекорд, завдяки досягненням компанії Winsun. На цей раз вдалося надрукувати на 3D-принтері стіну завдовжки 500 метрів. Ця конструкція розташована в місті Сучжоу і використовується для захисту міста від повеней (рисунок 1.18).

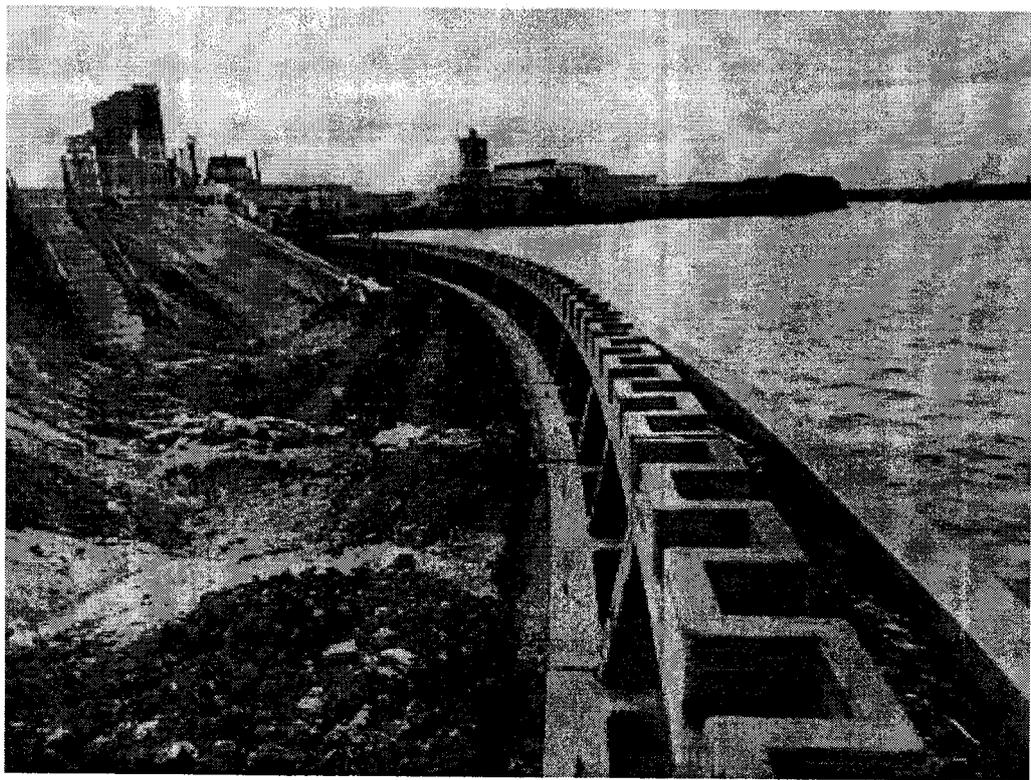


Рисунок 1.18 – Надрукована стіна для захисту від повеней в місті Сучжоу

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		25

Хоча стіна не є повністю надрукованою, а складається з окремих деталей, вона стала найбільшим об'єктом, який коли-небудь був створений за допомогою технології 3D-друку.

Облицювальна стіна, поглинаюча енергію хвиль, є надійним захистом від затоплень. Однак до сьогоднішнього дня технологія будівництва таких укріплень була дорога та складною. По-перше, берегова лінія часто має складний рельєф, що вимагає вирівнювання і може завдати шкоду навколишньому середовищу. По-друге, для будівництва укріплення потрібні матеріали, такі як цегла нестандартної форми, а також спеціально розроблені дамби та інші конструкції, що значно підвищує вартість проекту.

Технологія 3D-друку вирішила обидві ці проблеми. Здатність надрукувати стіну будь-якої форми дозволяє уникнути вирівнювання берегової лінії, що суттєво зменшує вплив на навколишнє середовище. Крім того, вартість та складність будівництва облицювальної стіни значно менші, ніж у традиційного аналога.

Це інноваційне рішення ідеально вписується в концепцію розвитку міста. Сучжоу, колишнє промислове місто, яке раніше отримувало прибуток від видобутку вугілля, було повністю перебудоване, створюючи сучасне та комфортне міське середовище з парками, зонами відпочинку, торговими та розважальними центрами.

Vos та ін. [19] з Технічного університету м. Ейндховен впровадили стратегію Contour Crafting для друку цементними сумішами. Для цього використовувався робот з чотирма ступенями свободи, який обслуговував область друку розміром 9 м × 4,5 м × 2,8 м. Матеріал подавався під тиском за допомогою насоса до екструдера головки (показано на рисунку 1.19). Така конструкція дозволила утворювати неперервний потік матеріалу в зону друку та високу продуктивність.

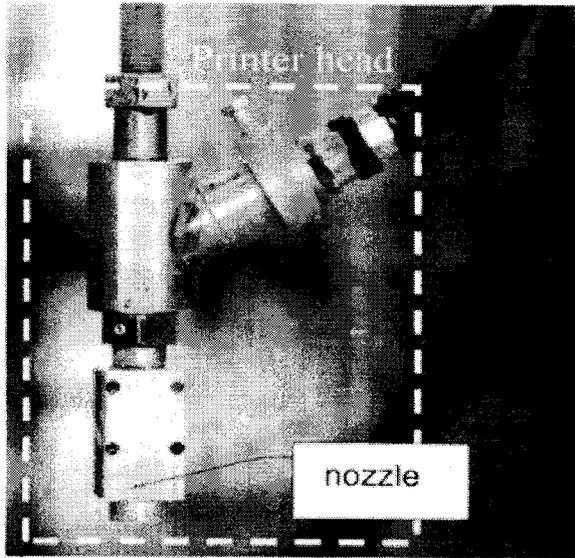


Рисунок 1.19 – Екструдер з шлангами подачі та неперервна подача матеріалу в зону друку

Значущим досягненням в аддитивному виробництві для нових будівельних проектів є 3D-принтер KameMaker висотою 6 м, розроблений архітекторами DUS Architects з Амстердама для друку будинків. KameMaker використовує поліпропілен як матеріал для друку компонентів великих розмірів [30,31]. Однак для несучих та конструкційних елементів даний матеріал занадто крихкий. У випадку використання аддитивного виробництва для створення несучих елементів, може бути використана технологія у вигляді друку мереж або систем, подібних до стрижнів, що є ще однією великою перевагою цієї технології, оскільки вона потенційно усуває процес встановлення опалубки, який в інших методах виробництва може становити до 60% від загальних витрат часу на проект бетонування [26].

Platt Boys, розробник C-Fab™ (Cellular Fabrication) [32], стверджували, що, друкуючи лише несучу структуру стіни, цей елемент може бути легко інтегрований в сучасне будівництво швидше, ніж, наприклад, друк будинків вцілому. Незважаючи на те, що багато розробок ще потрібно масштабувати, а роботи з оптимізації параметрів друку та реології матеріалів тривають,

узагальнений огляд досліджень у галузі аддитивного виробництва, які можуть бути впроваджені в будівельну індустрію.

Рисунок 1.20 ілюструє важливість взаємозалежності багатопараметрових основних компонентів аддитивного виробництва для будівництва. Кожен з компонентів складається з ряду параметрів та змінних. Для успішної реалізації аддитивного виробництва в будівництві потрібно ретельно вирішити три основні взаємопов'язані параметри:

1. Матеріали для друку: джерело та склад, дизайн сумішей з різними добавками та розмір частинок відіграють важливу роль у розвитку підбору матеріалів. З метою оптимізації змішування сировини для досягнення відповідного часу рухомості та часу затвердіння для забезпечення неперервної подачі до сопла екструдера.
2. Принтер: принтер, інтегрований з насосом, є важливим для виробництва в будівельній галузі. Тому тиск і витрати повинні бути вивчені відповідно до різних дизайнів сумішей. Швидкість та розмір налаштування принтера також визначаються для досягнення високої якості друку, тобто гладкої поверхні, кутів прямокутника та розрахункової стійкості. Швидкість витіснення сировинних матеріалів (наприклад, у сантиметрах за годину) впливає на швидкість будівництва, більше того, зменшення часу затвердіння може призвести до застигання сировини всередині системи принтера. Оптимізована система друку з неперервною подачею сировини повинна витіснити матеріал із постійною швидкістю, щоб не заважати взаємодії між шарами.
3. Геометрія: налаштований дизайн та результати перших двох параметрів безпосередньо вплинуть на реалізацію повнорозмірних будівельних блоків/об'єктів із розумною самозміцненою геометрією. Стійкість форми відкладених шарів та 3D-кривизни, структури типу ферми можуть забезпечити міцність та жорсткість надрукованих

					ГМтаМ 601МММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		28

об'єктів/будівельних блоків.

Аддитивне виробництво (3D друк) відзначається безліччю переваг, які може принести будівельному сектору, порівняно з традиційними техніками. Його вплив на ефективність та сталість процесів будівництва включає зменшення відходів матеріалів на 30% [20], економію енергії, можливість виробництва на місці, розширену архітектурну та дизайнерську свободу з меншими вимогами до ресурсів та зниженням викидів CO₂ протягом життєвого циклу продукту [40].

Впровадження 3D друку також призводить до значних змін у структурах праці. Зменшення кількості залучених працівників, створення безпечніших робочих середовищ та перехід до більш цифрових та локалізованих процесів, що стають характерними рисами цієї технології.

З погляду архітекторів, 3D друк виявляється потужним інструментом для їхнього бізнесу. Він дозволяє створювати фізичні моделі швидше і з кращою роздільною здатністю, реалізуючи складність їхніх дизайнів. Також, ця технологія дозволяє клієнтам активно розробляти нові продукти, ідеально відповідні їх вимогам та амбіціям.

Однак, не зважаючи на усі переваги, існують кілька обмежень, які ускладнюють широке застосування 3D друку в будівельній галузі. Сертифікація нових компонентів та їх характеристика залишаються однією з основних перешкод для впровадження 3D друку в будівельний процес. Особливо в Європі, де стандарти визначають процеси та вибір матеріалів для забезпечення послідовності та якості у будівельній галузі, відсутність таких стандартів у сфері 3D друку уповільнює його широке впровадження в виробництво друкованих будівель.

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		29

Соціально-економічні та екологічні впливи 3D друку в будівництві

Сучасна будівельна галузь переживає період різкого зміщення політики, слідуючи за зміною пріоритетів від бізнесу, орієнтованого на прибуток, до постійно адаптивної соціоекономічної та екологічно орієнтованої сутності. В цьому контексті матеріальні сировини, призначені для аддитивного виробництва (3D друку), повинні бути ретельно вибрані, щоб ця технологія могла продемонструвати свій вплив як екологічне та екоінноваційне рішення.

За допомогою 3D друку та можливість повторного використання та переробка відходів від демонтажу будівель можуть потенційно спрямувати успішну реалізацію циркулярної економіки в будівельній галузі. Однак для цього завжди потрібно ефективне сортування відходів та розумні операції демонтажу будівель, в тісній співпраці з дослідженням формулювання сировин (тобто вибір відповідних добавок та компонентних дизайнів), щоб створити технічно вдосконалені та комерційно здійснені друківані будівлі, використовуючи будівельні відходи як основний ресурс. Якщо цю амбіцію вдасться втілити, завдяки 3D друку буде можливо великою мірою роз'єднати зростання від видобутку ресурсів в будівельній галузі та відкрити шлях для значних екологічних, соціальних та економічних переваг.

3D друк як екоінновація в будівельному контексті передбачає створення нового та конкурентоспроможного процесу або системи, повністю зосередженої на задоволенні людських потреб мінімальною кількістю токсичних речовин та відходів. При оцінці сталості продуктів, виготовлених за допомогою технології 3D друку, потрібно розглядати весь їх життєвий цикл. Справжній процес виробництва — лише один з багатьох екологічних впливів, пов'язаних із життєвим циклом продукту [43].

Одним з показників успіху впровадження технології 3D друку в будівництво є її здатність зменшити загальний екологічний вплив на основі

					ГМтаМ 601МММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		30

життєвого циклу, оскільки це дозволяє виділятися передовим технологіям в будівництві, сприяючи при цьому екологічному та соціальному розвитку.

					ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		31

Проектування та реалізація мобільного будівельного комплексу на основі

2.1 Опис конструкторської пропозиції

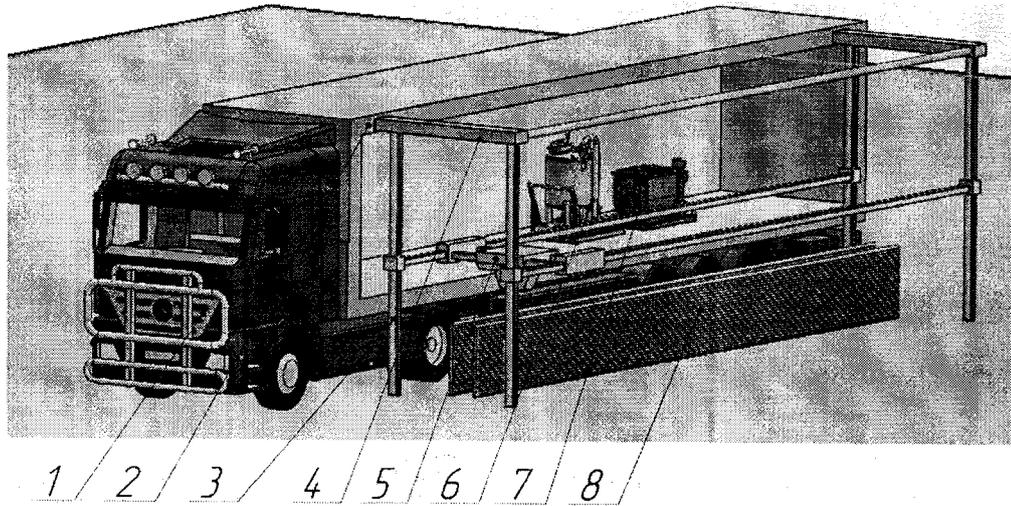
Нами пропонується конструкція 3d будівельного принтера-комплексу, який розміщений на базі вантажного напівпричепу Figure 8 обладнаного здвоєним екструдером з можливістю відключення одного сопла подачі.

Мобільний комплекс може використовуватися як автономний обладнаний змішувачем 7 та бетононасосом 6 який подає готову суміш до екструдера 5. Екструдер розміщується на металоконструкціях порталу 4 розміщеного на виносних телескопічних опорах 3. Місткість напівпричепу забезпечує можливість розміщення суміші для приготування розчину та інших компонентів.

Робота комплексу починається з того, що після приїзду на будівельний майданчик розгортається портал з екструдером який опирається на телескопічні опори. Потім відбувається приготування робочої суміші з компонентів які переміщуються за допомогою вбудованого змішувача. Подача готової суміші відбувається за допомогою бетононасосу через напірні трубопроводи до екструдера.

Забезпечення роботи електричної частини комплексу можливе за рахунок під'єднання зовнішньої електричної мережі живлення або використання вбудованого дизель генератора.

					ГМтаМ.601МММ.004-00.00.000 ПЗ					
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Проектування та реалізація мобільного будівельного комплексу на основі 3D-принтера					
Розроб.	Жила		<i>Жила</i>					Літ.	Лист	Листів
Перев.	Коробко							Н	33	
Керівник								Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Н. контр.	Васильєв			22.12						
Затв.	Орисенко		<i>Орисенко</i>	19.01						



1- тягач, 2- напівпричеп, 3- телескопічні виносні опори, 4- портал, 5- екструдер, 6- бетононасос, 7- змішувач, 8- роздрукований елемент.

Рисунок 2.1 – 3d будівельного принтера-комплексу який розміщений на базі вантажного напівпричепу

Схематично конструкція принтера складається з двох конструктивних елементів-блоків (рисунок 9). Перший блок складається з установки приготування та нагнітання будівельної суміші через рукава подачі до другого блока. Другий блок – складається з корпусу, в якому розміщається два вали з лопатками-активаторами суміші та шнеками. Друк будівельних конструкцій може відбуватися одночасно двома потоками або одним за рахунок використання окремих приводних двигунів. Дана конструктивна пропозиція дозволяє збільшити швидкість друку майже в два рази. Для пришвидшення процесу застигання суміші яка укладається в другий блок подається прискорювач твердіння суміші.

Отримані конструктивні елементи в подальшому при потребі можна використати як незнімну опалубку та заповнити утеплювачем або бетонним розчином.

Рисунок 2.2 – Система подачі суміші в зону друку

– блок приготування суміші 2 – блок екструдера

В роботі принтера який пропонується розробити використовується механізм екструзії. Екструзія – це метод формування в екструдері виробів або напівфабрикатів необмеженої довжини шляхом вижимання матеріалу через формуючу головку, геометрична форма вихідного каналу якої визначає профіль отриманого виробу.

Основним обладнанням екструзійного процесу є екструдер, обладнаний формуючою головкою. У екструдері суміш активується додаються компоненти для збільшення пастифікації, пластефікується, а потім вижимається через головку. Зазвичай екструдер входить до складу агрегату 3d будівельного принтера-комплексу (лінії) для виготовлення конкретного виробу.

За пристроєм та принципом роботи основного вузла, який вижимає суміш у головку, екструдери поділяються на шнекові, безшнекові (дискові) та комбіновані.

Основним обладнанням для друку сумістю методом екструзії є шнекові екструдери, також відомі як черв'ячні преси. Значно рідше застосовуються безшнекові, або дискові, екструдери, де робочим органом, що вижимає матеріал у головку, є диск особливої форми.

Комбіновані екструдери мають як робочий орган пристрій, що поєднує шнекову та дискову частини, і вони відомі як черв'ячно-дискові. Їх використовують для забезпечення хорошого змішувального ефекту, особливо при подачі багатокомпонентних сумішей.

Шнекові екструдери можуть бути різних типів: одно- та двошнекові; одно- та двоступеневі; універсальні та спеціалізовані; з осцилюючим (вздовж осі) та одночасно обертовим шнеком; із зоною дегазації та без неї; із обертанням шнеків в одну, в протилежні сторони і т.п.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМтаМ.601МММ.004-00.00.000 ПЗ

Лист

35

Найпростішим і часто використовуваним є одношнековий екструдер без зони дегазації.

Екструдер призначено для використання в процесі 3D друку будівельних конструкцій з будівельних сумішей. Робочий принцип екструдера наступний: суміш з бункера поступає в матеріальний циліндр-бункер, захоплюється обертовим шнеком (черв'яком) і транспортується до формуючої головки. Процес включає в себе подачу суміші від бетонозмішувача до бункера (зона живлення), активізацію суміші та подачу додаткових компонентів (фібра, пластифікатори) та подачу в зону видавлювання за допомогою шнека (зона дозування або живлення), після чого отриманий матеріал вижимається через формуючу головку.

Підготовка робочої суміші до формування, пластифікації, та подачі в головку здійснюється завдяки обертовому шнеку в циліндрі екструдера. Залежно від природи суміші та технологічних режимів друку використовують шнеки різного профілю, зокрема шнеки із змінною глибиною спірального каналу та із змінним кроком для ефективною подачі суміші .

2.2 Вибір основних параметрів 3d будівельного принтера

2.2.1 Підбір конструкції бункера та екструдера 3d будівельного принтера

Система екструзії 3D-принтера є надзвичайно важливою частиною загального процесу аддитивного виробництва. Багато параметрів впливають на екструзію будівельних сумішей.

Дизайн бункера та системи екструзії багатьма розробниками був результатом ітеративного методу проб і помилок, заснованого на реології будівельного матеріалу, наприклад, його текучості та екструдабельності.

					ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		36

На рис. 2.1 показано ескіз системи екструзії.

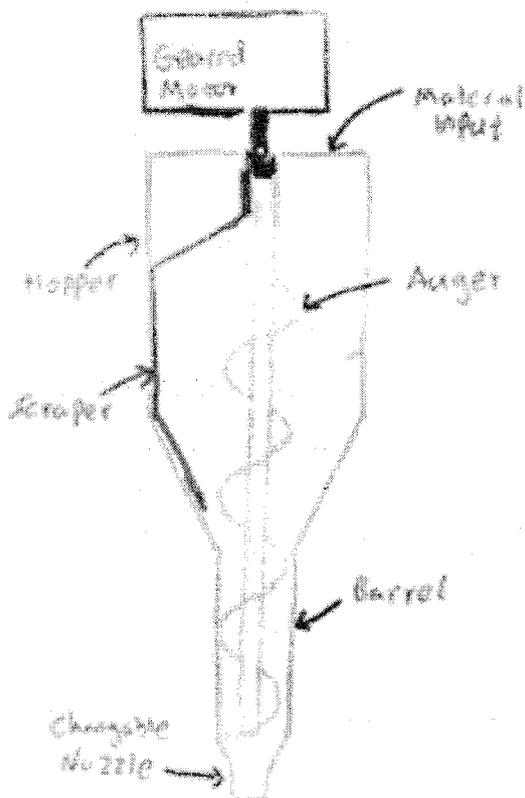


Рисунок 2.1 – Ескіз системи екструзії

Дизайн включає бункер для завантаження матеріалу, гвинтовий транспортер для транспортування матеріалів вниз і через форсунку, форсунку, яка формує виход матеріалу при екструзії, та редукторний двигун для приводу гвинта. Додатково додається скребок для перемішування матеріалу та забезпечення постійної екструзії. Рис. 2.2 та 2.3 показують конструкцію запропонованого екструзійного бункера.

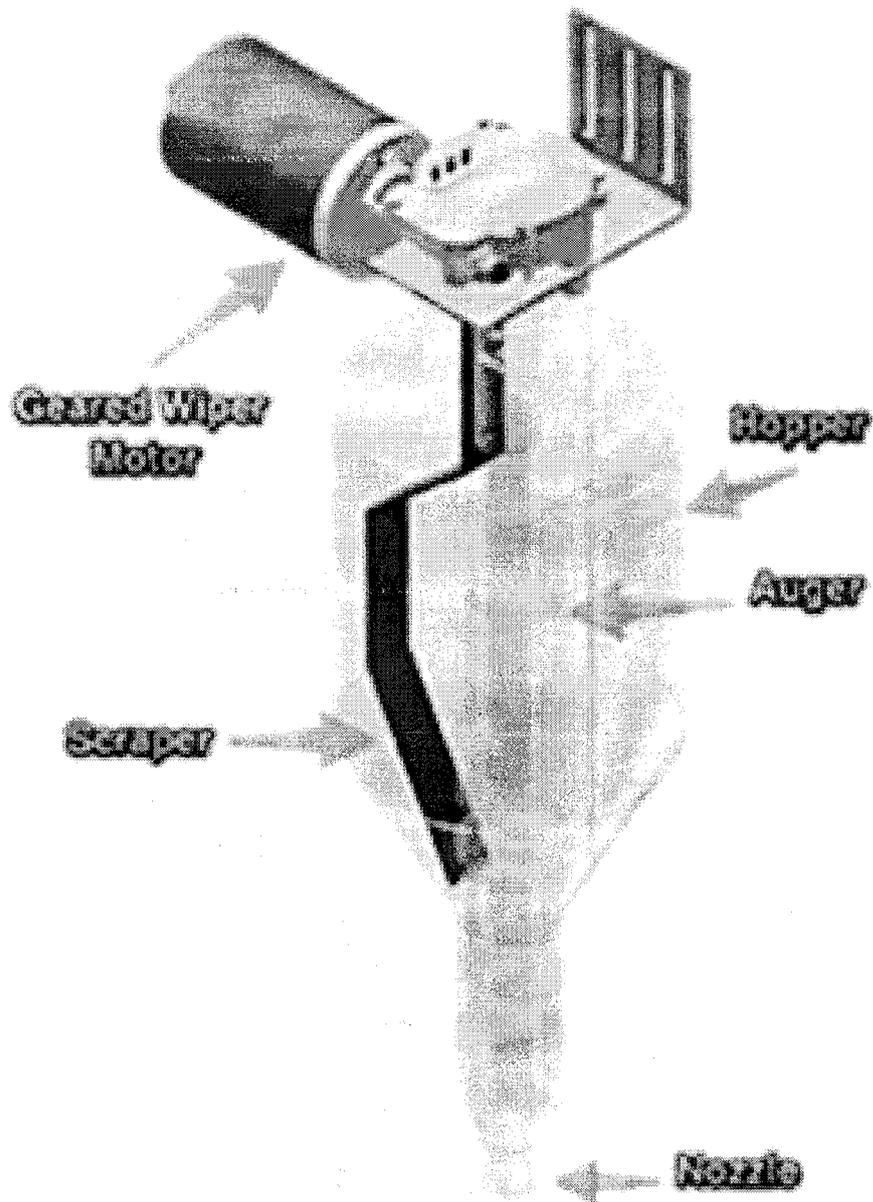


Рисунок 2.2 – Конструкція екструзійного бункера

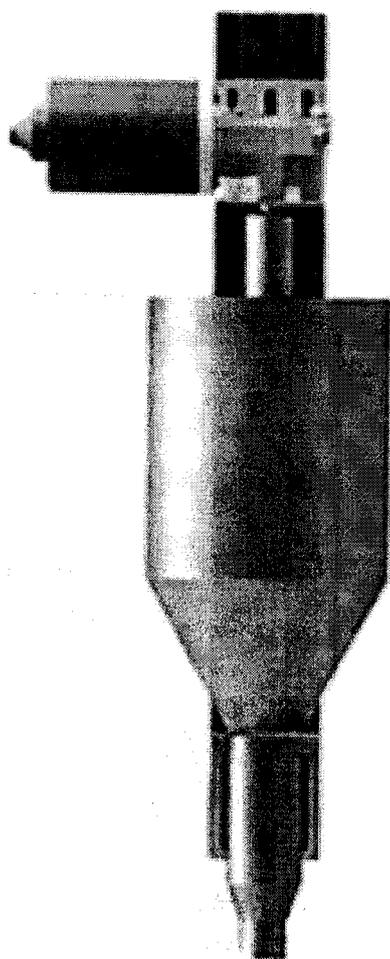


Рисунок 2.3 – Конструкція екструзійного бункера

Діаметр бункера обирається з урахуванням розміру шнека. Кут нахилу бункера проектується з метою досягнення масового режиму руху, як показано на рис. 2.4 та 2.5. Для багатьох матеріалів проблеми течії, такі як нестабільна течія, сегрегація матеріалів та деградація частинок в стоячих областях, можуть бути усунені шляхом забезпечення існування масового режиму руху в бункері [13]. З урахуванням характеру матеріалу для друку та важливості збереження його однорідності дизайн. При конструкції бункера потрібно уникати будь-яких гострих чи крутих кутів, які додають непотрібний тиск суміші, забезпечуючи плавний потік до екструдера.

					ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		39

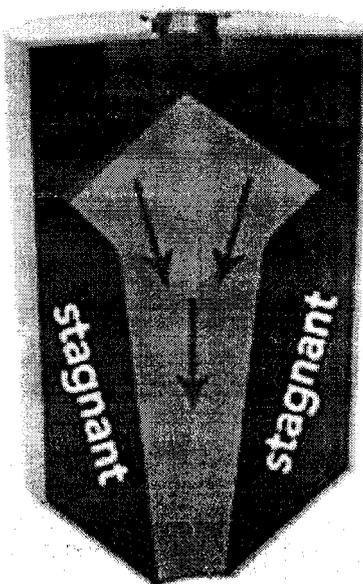


Рисунок 2.4 – Кут нахилу бункера з потоком типу воронка

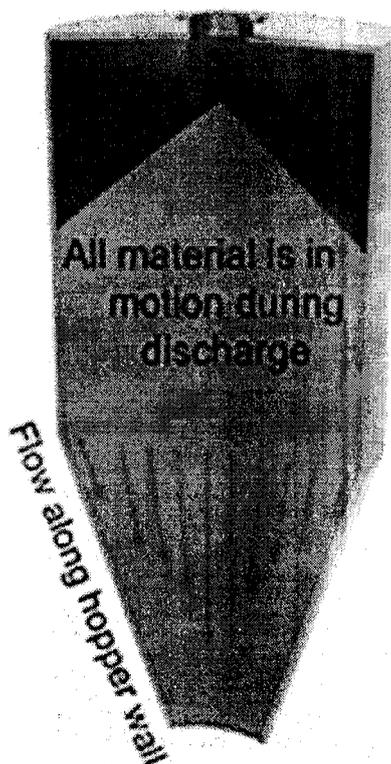


Рисунок 2.5 – Кут нахилу бункера з масовим потоком

Для отримання придатної екструзії для матеріалів, наприклад, неньютонівських псевдопластичних рідин з типовою поведінкою зменшення зсуву [14], необхідно використовувати пристосування для перемішування.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ

Лист

40

Перемішування сприяє можливості перекачування матеріалів для друку шляхом зниження ефективного зсувного напруження за рахунок зменшення тертя між внутрішніми частинками [15]. Таким чином, рекомендується встановлювати лопасті або скребки в бункері, які створюватимуть додатковий ефект перемішування матеріалів всередині бункера і забезпечуватиме повне вивантаження розчину. Таким чином, бункер можна використовувати як самостійну систему екструзії без зовнішнього насоса для невеликих і середніх друків. Лопасті або скребок в бункері є невід'ємною частиною системи екструзії з можливістю додавання вібраційного мотора для поліпшення текучості та щільності цементовмістних матеріалів. Рисунок 2.6 демонструє узагальнену конструкцію шнека та скребка [14].

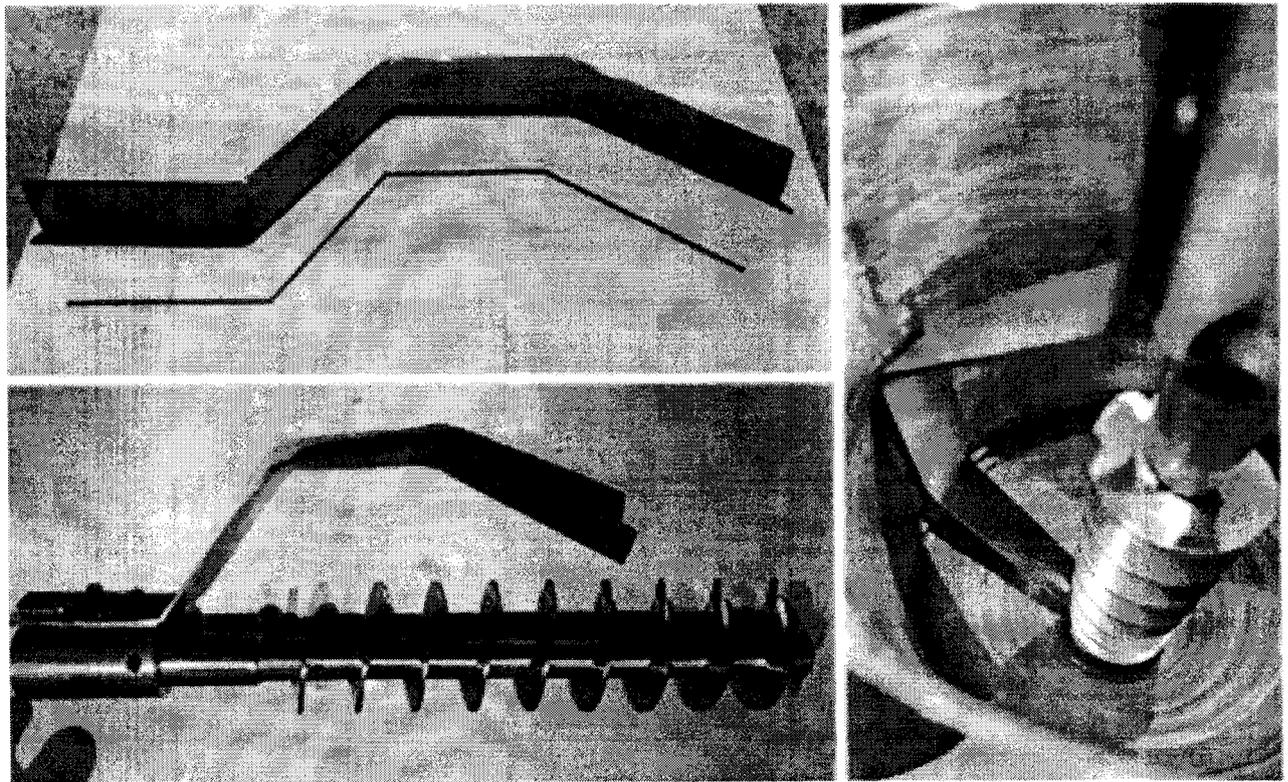


Рисунок 2.6 – Конструкція шнека та шкребка [14]

2.2.2 Підбір конструкції екструдера

Для досягнення успішного друку розмір форсунки екструдера відіграє визначальну роль у формуванні виведення матеріалів та визначенні можливостей будівництва кінцевої структури. Залежно від спроектованого об'єкта, наприклад, його розміру та необхідної роздільної здатності, розмір форсунки може бути змінений на менший або більший. На рис. 2.7 показана конструкція форсунки – екструдера яка розбірна і дозволяє змінювати внутрішній діаметр вихідного отвору за допомогою змінних вставок (рисунок 2.8).

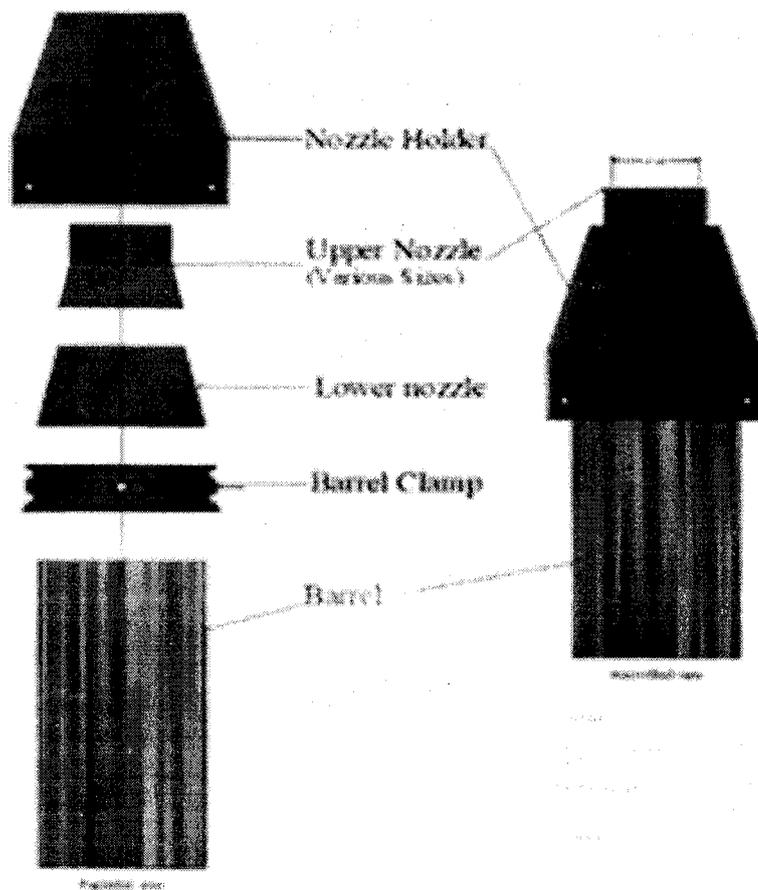


Рисунок 2.7 – Форсунка – екструдер

					ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		42

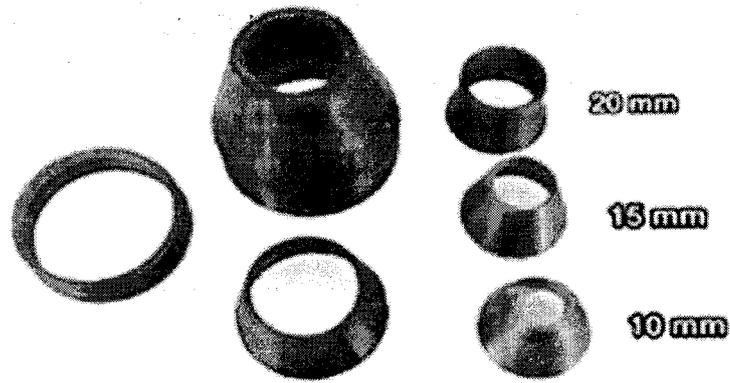


Рисунок 2.8 – Змінні вставки форсунки екструдера

Ця система форсунки приєднується до бункера, та може легко встановлюватися та відділятися. Різні розміри форсунок, використовуваних для визначення найефективнішого розміру форсунки для друку цементномістких матеріалів. Для вибору оптимального розміру форсунки авторами роботи[14] було надруковано зразки для кожного розміру форсунки (рисунком 2.9).

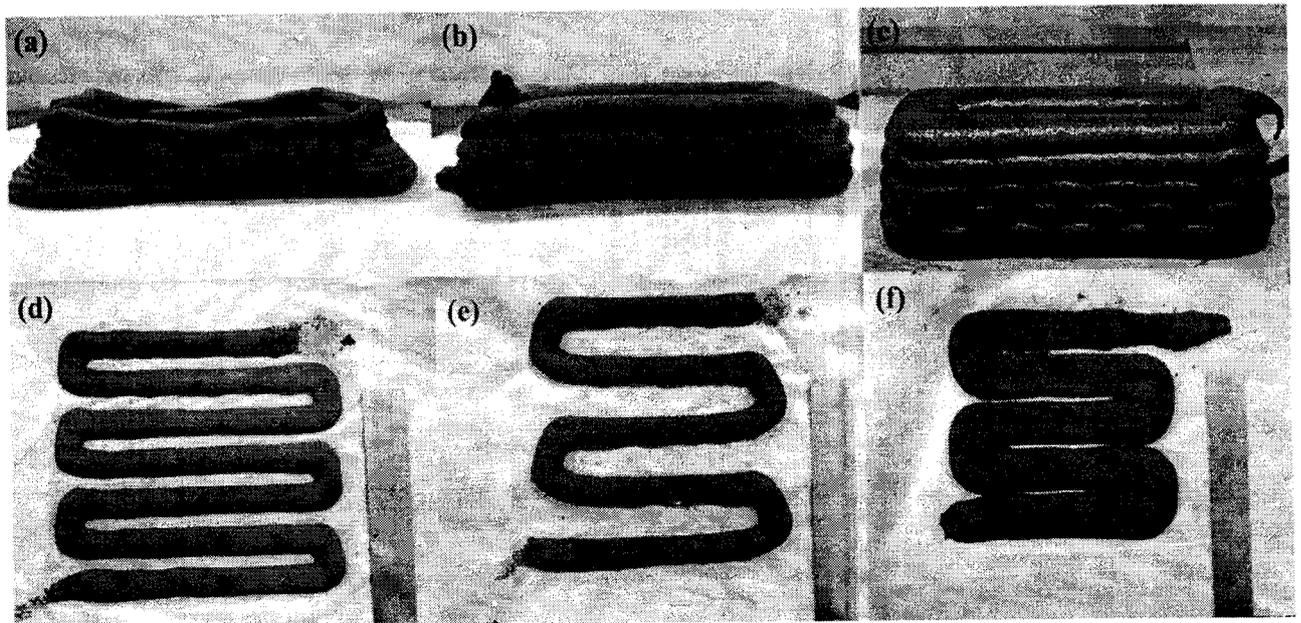


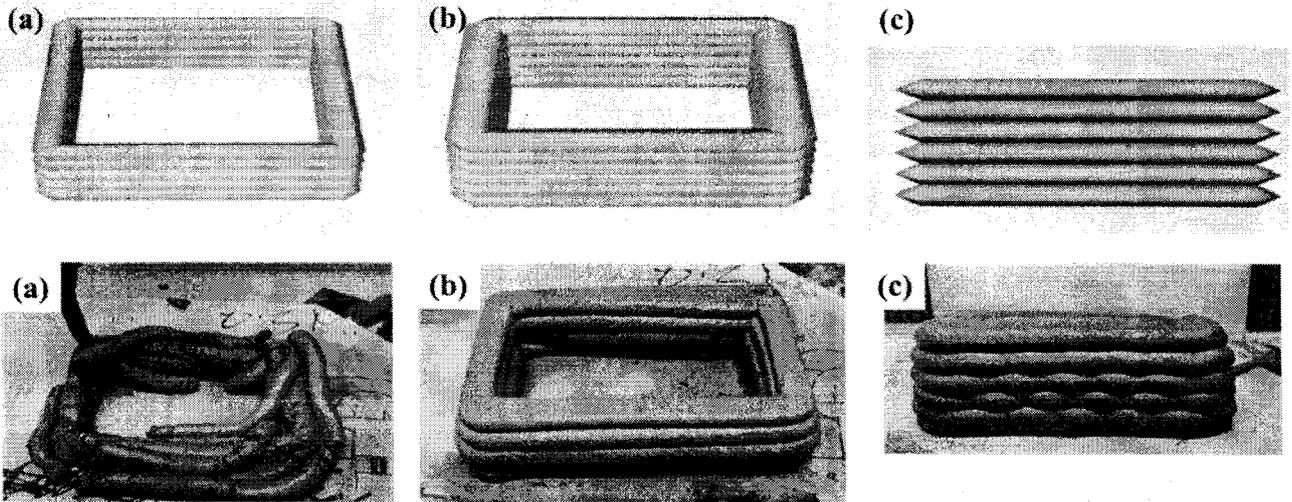
Рисунок 2.8 – Надруковані зразки за допомогою форсунок різних діаметрів (а, d) за допомогою форсунки 10 мм (b, e) форсунки 15 мм та (с, f) форсунки 20 мм.

Перший - це прямокутний зразок (рис. 2.8 a,b,c), який використовується для оцінки можливості форсунок вкладати шари один на один без обвалювання (тобто можливості будівництва). Другий зразок (рис. 2.8 d,e,f) визначає ширину екструзії, різними розмірами вставок, та деталі, які вони можуть надруковувати. Надруковані об'єкти були надруковані неперервно в зигзагоподібній формі. Менший діаметр форсунки призводить до більш детальних об'єктів, проте це супроводжується меншою можливістю будівництва, як показано на рис. 2.8 а. З іншого боку, більша форсунка створить грубшу структуру, але покращить можливість будівництва. В роботі авторів зазначається, що використання форсунки діаметром 20 мм дозволяє досягти найкращих результатів будівництва.

Шлях друку, швидкість переміщення каретки, швидкість екструзії та висота шару відомі як основні параметри процесу 3D-друку. Як правило для визначення оптимальних параметрів друку розробляються різні 3D-моделі або проводяться експериментальні дослідження.

В роботі [16] зазначається, що 3D-друкований зразок, прямокутний шлях, розміром 150x150x100 мм (рис. 2.9), щоб вивчити інші параметри друку, такі як швидкість руху каретки, висота шару або роздільна здатність та швидкість екструзії. Слід відзначити, що для всіх експериментів розмір форсунки був встановлений на 20 мм, оскільки це забезпечило найкращу швидкість потоку для геополімерів.

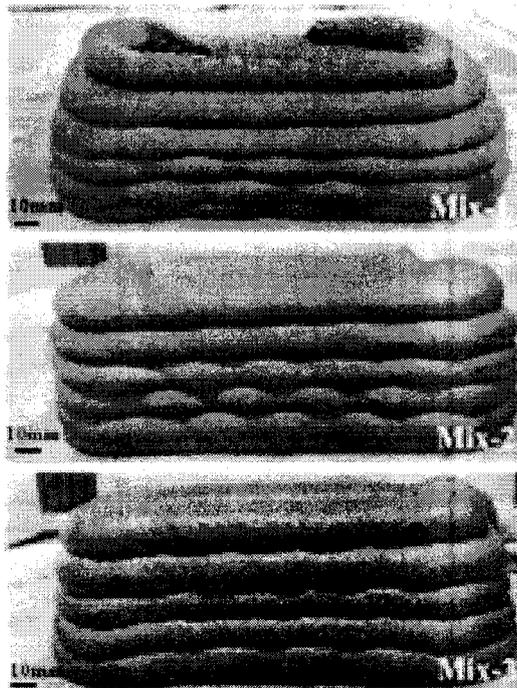
3D-друковані об'єкти виконувались із швидкістю голови принтера 30 мм/с, висотою шару 15 мм та швидкістю екструзії 50% (див. рис. 2.9 а). Як можна побачити, початкові налаштування призвели до неуспішного друку через велику висоту шару. Тому були внесені коригування, а саме зменшення швидкості до 20 мм/с та висоти шару до 10 мм, але зі збереженням тієї ж самої швидкості екструзії, що призвело до успішного друку, як показано на рис. 2.9 б.



а) швидкість 30 м/с діаметр сопла 15 мм, б) швидкість 20 м/с діаметр сопла 10 мм, в) швидкість 20 м/с діаметр сопла 20 мм,

Рисунок 2.8 – Надруковані зразки

На рисунку 2.9 показано пошаровий друк з різними швидкостями при діаметрі сопла 10мм



а) швидкість 30 м/с діаметр сопла 10 мм, б) швидкість 20 м/с діаметр сопла 10 мм, в) швидкість 10 м/с діаметр сопла 20 мм,

Рисунок 2.9 – Надруковані зразки

Як видно із рисунка 2.9 при швидкості 30 м/с та діаметрі сопла 10 мм спостерігається нерівномірність нанесення шару, при швидкості 20 м/с та діаметрі сопла 10 мм спостерігається рівномірне нанесення шару без видавлення нижніх шарів, при швидкості 10 м/с та діаметрі сопла 10 мм спостерігається видавлювання нижніх шарів, що призводить до втрати геометрії зразка.

Важливо відзначити, що швидкість екструзії, контрольована швидкістю двигуна екструдера, взаємно пропорційна і може змінюватися в залежності від консистенції суміші під час випробувань.

Розрахунок геометрії шнека 3d будівельного принтера та визначення частоти його обертання

В якості початкового параметра для розрахунку 3d будівельного принтера встановлюється основний параметр - діаметр шнека D .

Якщо він не заданий, його можна взяти з технічних характеристик передбаченої технологічної лінії для 3d друку або приблизно розрахувати за відповідністю (в мм).

де Q - об'ємна продуктивність, $\text{мм}^3/\text{с}$. Отримане значення діаметра шнека округлюють до найближчого більшого числа зі стандартного ряду діаметрів шнеків для конкретного типу полімерного матеріалу, враховуючи вимоги 3D-принтера. Після вибору діаметра і відношення L/D приступають до визначення інших параметрів, що враховують особливості 3D-друку, такі як швидкість подачі матеріалу та необхідність точності друку.

					ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		46

Крок нарізки t та глибина витка h суттєво впливають на продуктивність шнекової машини 3D-принтера. Крок витка в зоні завантаження визначається не тільки коефіцієнтом тертя матеріалу о шнек і стінки матеріального циліндра, але й швидкістю подачі матеріалу для друку та вимогами щодо якості друку. Для зони завантаження рекомендується приймати крок від $0,7$ до $1,5D$, з урахуванням специфічних вимог 3D-принтера.

Для зони дозування нарізка шнека може враховувати властивості матеріалів, які використовуються в 3D-друці, такі як температурна чутливість, і забезпечувати необхідну точність друку. Рекомендується враховувати основні параметри: швидкість та стабільність подачі матеріалу для друку при виборі кроку нарізки t .

Додатково, при роботі з цементною або гіпсовою сумішшю, важливо враховувати їхні особливості, такі як в'язкість та температурні умови для досягнення оптимальних результатів друку. Також слід розглядати вибір матеріалів шнека та конструктивні особливості з урахуванням вимог, що стосуються обробки цементної або гіпсової суміші.

У контексті 3D-принтера, де точність і рівномірність подачі матеріалу є критичними факторами для якості друку, обрання кроку нарізки t рівним діаметру шнека ($t = D$) може бути важливим кроком для забезпечення оптимальних умов друку. Це дозволяє досягти не тільки стабільної і рівномірної подачі матеріалу, але також спрощує технологічний процес виготовлення шнека для 3D-принтера.

Додатково, для досягнення високих ступенів стиснення матеріалу при

					ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		47

друці можуть бути використані шнеки зі змінним за довжиною кроком нарізки. Це може бути корисно для регулювання параметрів друку в залежності від властивостей конкретного матеріалу та вимог до якості друку.

При виборі глибини винтового каналу важливо враховувати особливості матеріалу, які використовується у 3D-друці, такі як температурна чутливість та потреба в точності друку. Рекомендації щодо глибини винтового каналу можуть бути адаптовані з урахуванням конкретних умов та вимог, характерних для 3D-принтера та матеріалів, які використовуються.

Для 3D-принтера важливим є не лише оптимальна глибина винтового каналу в зонах питання та дозування, але і врахування особливостей процесу друку.

У зоні завантаження, глибина винтового каналу також повинна враховувати можливі варіації властивостей матеріалу та його подачу в принтер.

$$h_1 = (0.12...0.16)D$$

В зоні дозування для 3D-принтера, крім забезпечення точності друку, важливо враховувати потреби в рівномірній подачі матеріалу та можливість швидкого регулювання глибини винтового каналу для адаптації до різних умов друку та властивостей матеріалу.

$$h_3 = 0.5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right]$$

Вибір ступеня стиснення матеріалу (i) на основі Таблиці 2.1 визначається врахуванням конкретних рекомендацій для кожного матеріалу та виду виробу.

Вибір ступеня стиснення матеріалу (іноді також називається "ступенем живлення") для цементних або гіпсових сумішей може залежати від типу

					ГМтаМ.601МММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
						48
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

шнеку та його конструктивних параметрів. У загальному випадку, ступінь стиснення визначається відношенням глибини каналу в зоні живлення (поживлення) до глибини каналу в зоні дозування.

Ступінь стиснення цементної або гіпсової суміші залежить від декількох факторів, включаючи тип шнека. Шнек - це обертовий елемент, який використовується для перемішування та подачі матеріалу. Тип шнека може впливати на ступінь стиснення суміші наступними способами:

Діаметр шнека: Шнек з меншим діаметром створює більший тиск на суміш, що може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Швидкість шнека: Шнек з більшою швидкістю створює більший відцентровий тиск на суміш, що також може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Кут нахилу шнека: Шнек з більшим кутом нахилу створює більший обертовий момент, що також може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Загалом, шнеки з меншим діаметром, більшою швидкістю та більшим кутом нахилу будуть створювати більший тиск на суміш, що може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Однак, важливо зазначити, що тип шнека не є єдиним фактором, який впливає на ступінь стиснення. Інші фактори, які можуть впливати на вибір ступеня стиснення, включають швидкість виходу матеріалу, величину і тип зерен матеріалу, його вологості та інші властивості.

З Таблиці 2.1 можна взяти значення середнього градієнта швидкості зсуву γ , числа витків в зоні дозування, і відношення глибини каналу в зоні живлення та дозування для конкретного матеріалу та типу виробу.

Загальною метою визначення глибини винтового каналу для 3D-принтера є забезпечення стабільної та точної подачі матеріалу в процесі друку, що є ключовим для отримання високоякісних та деталізованих друкованих будівельних конструкцій.

					ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
						49
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

що є ключовим для отримання високоякісних та деталізованих друкованих будівельних конструкцій.

Таблиця 2.1 – Конструктивні параметри шнеків для використання в 3D-принтерах

Полімерний матеріал	Середній градієнт швидкості зсуву $\gamma, \text{с}^{-1}$	Число витків в зоні дозування	Коефіцієнт стиснення (відношення глибини каналу в зоні живлення та дозування)
Гіпсова суміш	15...20	4...6	1,1...1,35
Сементна суміш	10...23	3...6	1,05...1,25

У таблиці подано рекомендовані конструктивні параметри шнеків для обробки різних полімерних матеріалів та виготовлення різних видів виробів. Глибина винтового каналу, кількість витків та коефіцієнт стиснення визначаються з урахуванням властивостей конкретного матеріалу та типу виробу для досягнення оптимальних умов обробки.

У зоні пластифікації (стиснення).

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} L_0 \quad (2.5)$$

$$L_0 = L - L_H \quad (2.6)$$

де L – довжина шнека, см;

L_0 – довжина шнека до зони стиснення, см;

L_H – довжина тискової частини шнека, см.

$$L_H = (0.4...0.6)L \quad (2.7)$$

Ширина гребня витка шнека e рекомендується приймати такою, щоб уникнути збільшення потужності, оскільки збільшення товщини витка призводить до зростання витрати енергії, тоді як зменшення її може призвести до утворення значного потоку витoku через зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека.

$$e = (0,06 \dots 0,1)D. \quad (2.8)$$

Менші значення рекомендується приймати для діаметрів шнека більше 125 мм, тоді як більші значення - для діаметрів менше 125 мм. Радіальний зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека рекомендується приймати

$$\delta = (0,002 \dots 0,005)D. \quad (2.9)$$

При цьому менші значення приймаються для великих діаметрів шнеків. Частота обертання шнека суттєво впливає на продуктивність шнекових машин. Її зростання спостерігається до певного значення частоти обертання шнека (критичного), після чого починається нестійке рух матеріалу (частинки матеріалу припиняють рухатися в осьовому напрямку і лише обертаються разом із шнеком). Це призводить до зменшення продуктивності, збільшення споживаної потужності та збільшеного зносу робочих частин машини.

Величину критичної частоти обертання шнека в зоні завантаження шнекової машини можна визначити за наступним співвідношенням (c^{-1}):

$$n_{\text{крит}} = \frac{42,2}{60\sqrt{D}} \quad (2.10)$$

де D - діаметр шнека, м

В зонах стиснення і дозування допустиму частоту обертання шнеків значно зменшують, щоб уникнути через мірного витіснення суміші.

Робоча частота обертання шнека дорівнює

$$n_p = (0,2 \dots 0,7) n_{\text{кри}}, \quad (2.11)$$

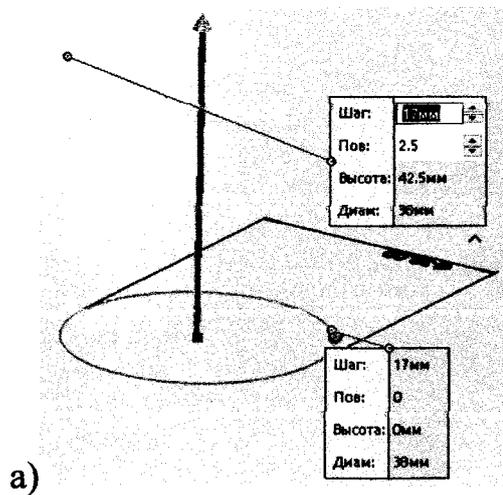
де нижні значення числових коефіцієнтів приймаються для малих діаметрів шнеків, верхні - для великих значень. На практиці частота обертання знаходиться в межах від 0,08 до 4,2 с^{-1} .

Провівши розрахунки ми визначили наступні конструктивні розміри шнека для створення дослідного стенда пристосування, що дозволить визначити крутний момент шнека який потрібний для роботи бункера – екструдера та дозволить в майбутньому підібрати електроприводи принтера.

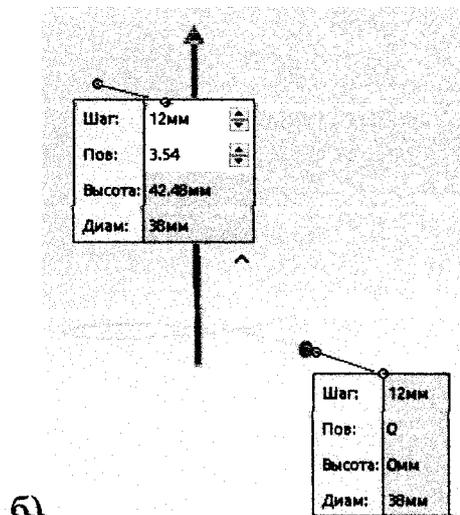
Ми приймаємо шнек діаметром 38мм, висотою 42,5 мм. Та зовнішню частину – бункер із отвором для видавлювання гіпсової суміші діаметром 12 мм.

За допомогою програми SolidWorks було створено спіраль моделі шнека (рисунок 2.10) в двох варіантах. Перший варіант із шагом 17 мм другий варіант із шагом 12 мм.

Варіант моделі шнека із шагом 12 мм зроблено таким чином, що спіраль нахилена на 30^0 відносно горизонталі в низ. 3D моделі обох шнеків зображено на рисунку 2.11



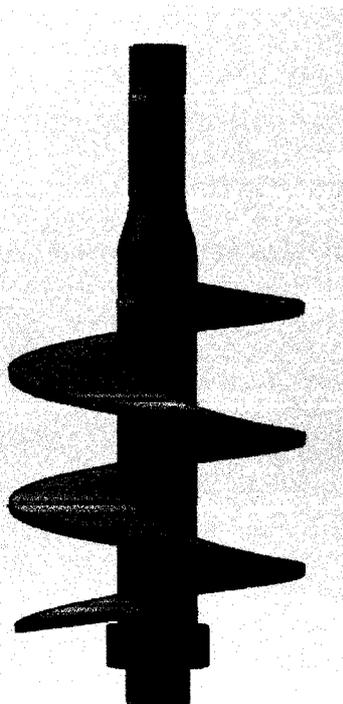
а)



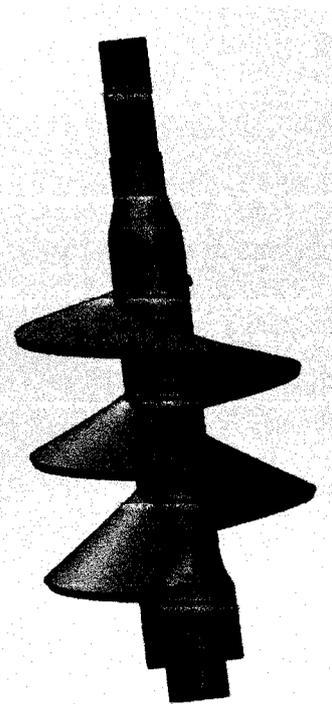
б)

а) із шагом 17 мм б) із шагом 12 мм.

Рисунок 2.9 – Спіраль моделі шнека



а)



б)

а) із шагом 17 мм б) із шагом 12 мм.

Рисунок 2.10 – 3D моделі шнека

Корпус бункера (рисунок 2.11) спроектовано таким чином щоб можна було провести дослідження із визначення крутного моменту шнека для роботи екструдера.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ

Лист

53

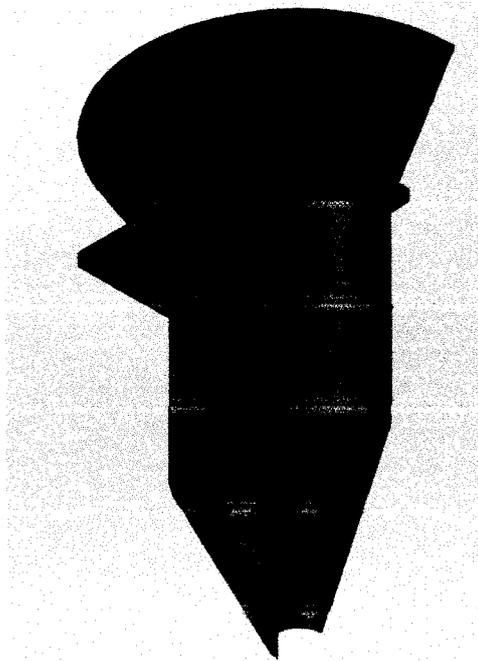


Рисунок 2.11 – 3D модель бункера

Також розроблена модель складального креслення пристосування для визначення крутного моменту шнека (Рисунок 2.11). Процес формування слоїв при друку на 3D-принтері відбувається потапно і зображений на рисунку 2.13

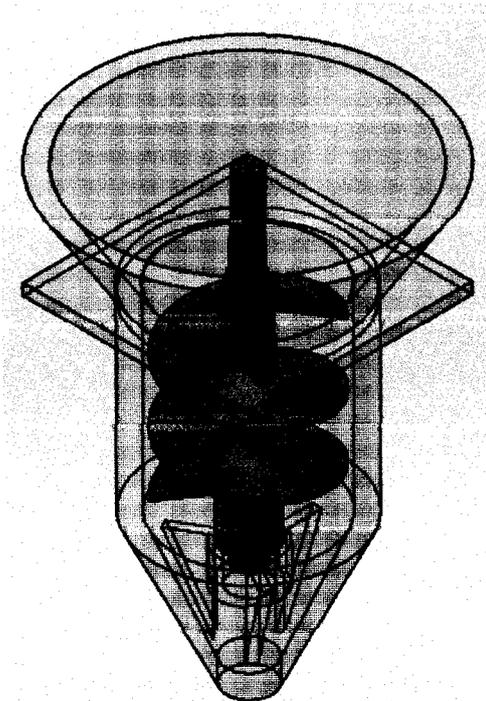


Рисунок 2.11 – 3D модель експериментального пристосування

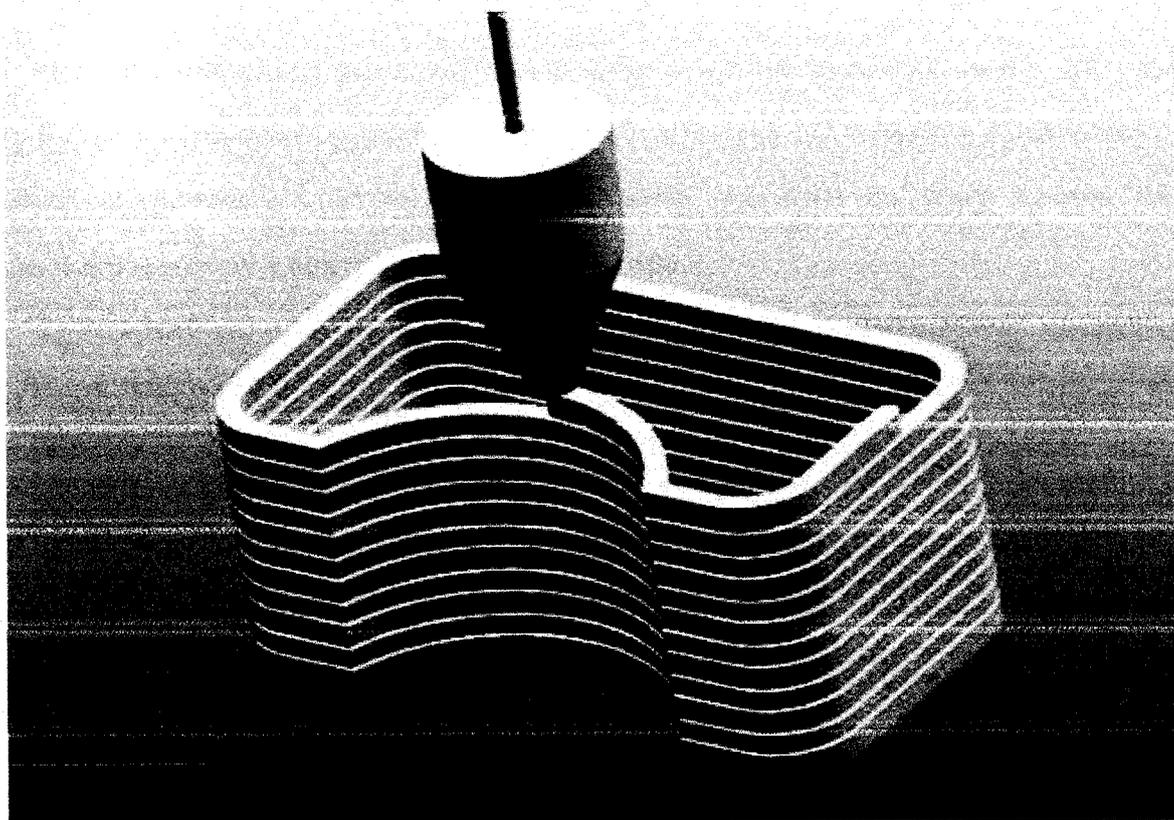


Рисунок 2.12 – Схема формування слоїв будівлі

3 Експериментальні дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій

Експериментальні дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій повинно забезпечити проведення дослідження стосовно визначення крутного моменту який виникає на валу шнека для подальшого підбору електроприводу принтера.

За допомогою принтера для друку пластиком було виготовлені елементи екструдера (рисунок 3.1)

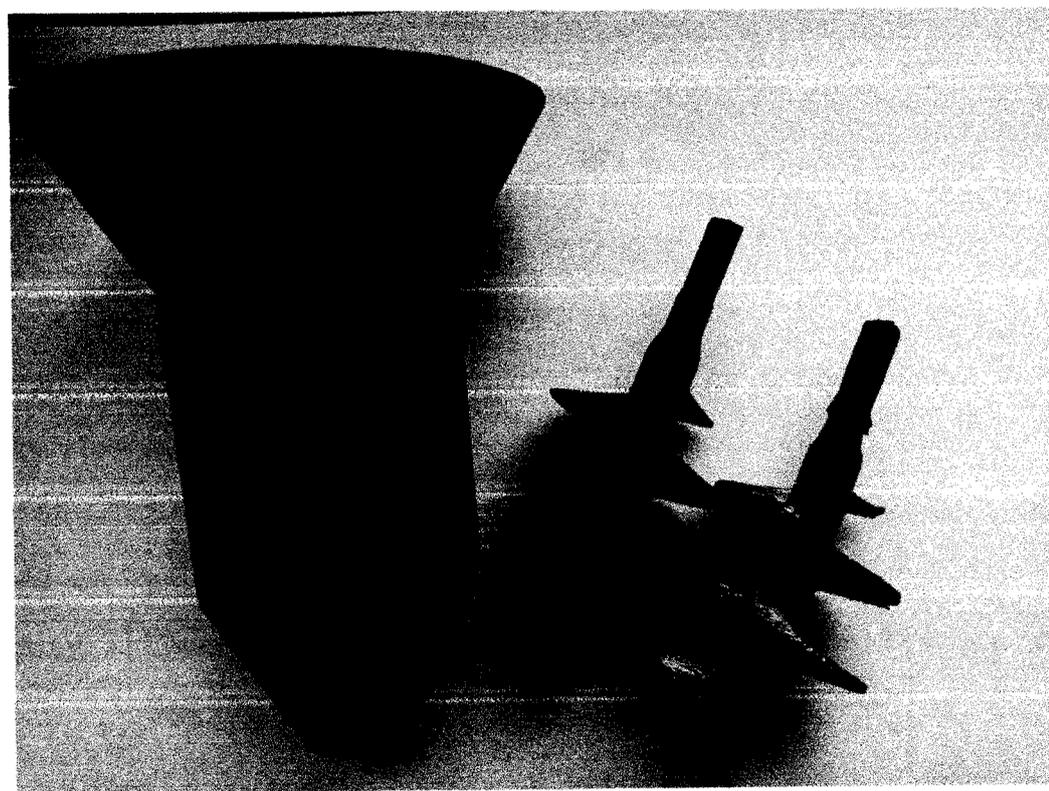


Рисунок 3.1 – Роздруковані елементи екструдера

ГМтаМ 601мММ.004-00.00.000 ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат
Розроб.	Жила		<i>[Signature]</i>	
Перев.	Коробко		<i>[Signature]</i>	22.12
Керівник			<i>[Signature]</i>	
Н. контр.	Васильєв		<i>[Signature]</i>	22.12
Затв.	Орисенко		<i>[Signature]</i>	19.01
			Експериментальні дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій	
		Лім.	Лист	Листів
		Н	57	
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»				

Дослід із визначення крутного моменту для шнека проводився наступним чином. На спеціальний штатив було закріплено екструдер в який було подано гіпсову суміш. Через плече 0,2 м було прикладене через кантер зусилля. Дослід проводився по 6 разів для кожного типу шнека.

Момент сили (крутний момент) можна знайти за допомогою формули (3.1):

$$M = F \times l \quad (3.1)$$

де:

M - момент (Н·м),

F - сила, яка діє на важіль, (Н),

l - довжина важіля (м).

У даному випадку: $F = 1,6 \text{ Н}$ $l = 0,2 \text{ м}$.

Підставимо ці значення в формулу:

$$M = 1,6 \times 0,2 = 0,32$$

Отже, крутний момент дорівнює 0,32 Н·м.

В таблиці 3.1 наведено результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 14 мм.

Таблиця 3.1 – Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 14 мм.

№ досліду	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	1,60	0,2	0,320	32
2	1,52	0,2	0,304	35
3	1,48	0,2	0,296	38
4	1,62	0,2	0,324	29
5	1,54	0,2	0,309	41
6	1,36	0,2	0,273	39

В таблиці 3.2 наведено результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 12 мм.

Таблиця 3.2 – Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 12 мм.

№ досліду	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	1,85	0,2	0,370	44
2	1,80	0,2	0,360	48
3	1,76	0,2	0,352	47
4	1,92	0,2	0,384	43
5	1,84	0,2	0,368	49
6	1,96	0,2	0,392	48

Таблиця 3.3 – Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 16 мм.

№ досліду	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	2,18	0,2	0,436	34
2	1,96	0,2	0,392	38
3	2,23	0,2	0,446	42
4	2,32	0,2	0,464	36
5	2,04	0,2	0,408	40
6	2,11	0,2	0,422	32

Для шнека з шагом 14 було визначено кількість суміші яка виходила з екструдера при силах 1,60Н; 1,52Н; 1,48Н; 1,62Н; 1,54Н; 1,36Н видавалося гіпсової суміші 32 г; 35 г; 38 г; 29 г ; 41 г; 39 г. Для шнека з шагом 12 було визначено кількість суміші яка виходила з екструдера при силах 1,85Н; 1,80Н; 1,76Н; 1,92Н; 1,84Н; 1,96Н видавалося гіпсової суміші 44 г; 48 г; 47 г; 43 г ; 49 г; 48г.

Теоретичні основи обробки експериментальних даних

Побудова та дослідження статистичної матмоделі зводиться до:

- попередньо дослідження об'єкту;
- вибір критерію оптимізації;
- побудови статистичної матмоделі і оцінки її адекватності та відтворюваності;
- можливості використовувати дану модель для оптимізації процесу та встановлення найраціональніших параметрів системи.

З метою визначення ступеню впливу фактору на критерії оцінки потрібно шляхом проведення експерименту встановити залежність, яка досягається проведенням апроксимації.

Самим точним методом апроксимації вважають метод поліноміального опису даного процесу з використанням рівняння регресії, що у загальному випадку може бути представлено у вигляді:

Поліноміальна модель для проведення досліджень має вигляд

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^k a_{ij} x_i x_j, \quad (3.2)$$

де $i, j = 1, 2, \dots, k$ – порядкові номери факторів;

y_i – величина, яка оптимізується;

x_i, x_j – вхідні фактори у кодованій формі;

k – кількість факторів;

a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} – коефіцієнти рівняння регресії.

Для визначення коефіцієнтів рівняння використовуються наступні формули

$$a_0 = \bar{y}_0, \quad (3.3)$$

$$a_i = A \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot y_u, \quad (3.4)$$

$$a_{ii} = B \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C_1 \sum_{j=1}^k \sum_{u=1}^N x_{ju}^2 y_u - \frac{y_0}{S}, \quad (3.5)$$

$$a_{ij} = D_1 \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u, \quad (3.6)$$

де \bar{y}_0 – середнє значення спостережень, зроблених у нульовій точці;

N – число точок експерименту плану;

A, B, C_1, D_1, S – постійні коефіцієнти, що визначаються структурою матриці планування.

Вибіркова дисперсія в u -ому досліді визначається за формулою

$$S_{yu}^2 = \frac{1}{\gamma_u - 1} \sum_{i=1}^{\gamma_u} (y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (3.7)$$

де $f_u = (\gamma_u - 1)$ – ступень свободи;

$\bar{y}_u = \frac{1}{\gamma_u} \sum_{i=1}^{\gamma_u} y_{ui}$ – математичне сподівання функції відгуку в u -тій точці експерименту.

Значимість коефіцієнтів регресії визначається за t -критерієм Стюдента. Коефіцієнт регресії вважається значущим, якщо

$$t_{\text{факт}} = \frac{a}{S_{(a_{0,i,j})}} > t_{\text{табл}}, \quad (3.8)$$

де $S_{(a)}$ – дисперсія, що характеризує помилки у визначенні коефіцієнтів.

Вона визначається за формулами

$$S_{(\infty)}^2 = \frac{l}{n_0} S_{(y)}^2; \quad (3.9)$$

$$S_{(ai)}^2 = A S_{(y)}^2; \quad (3.10)$$

$$S_{(aii)}^2 = \left(B + \frac{l}{S^2 n_0} \right) S_{(y)}^2; \quad (3.11)$$

$$S_{(aij)}^2 = D_i S_{(y)}^2, \quad (3.12)$$

$$\text{де } S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}.$$

Адекватність отриманої моделі результатам експерименту перевіряють за умовою Фішера

$$F \leq F_{\text{табл}}, \quad (3.13)$$

де $F_{\text{табл}}$ – табличне значення F -розподілу;

$$F = \frac{SS_L \cdot f_E}{SS_R \cdot f_L} - \text{дисперсійне відношення};$$

$SS_L = SS_R - SS_E$ – сума квадратів, пов'язана з дисперсією, що визначає неадекватність представлення результатів експерименту;

$$SS_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2 - \text{сума квадратів, пов'язана з дисперсією, що характеризує}$$

похибку досліду;

$$SS_R = \left[\sum_{u=1}^N y_u^2 - \frac{\left(\sum_{u=1}^N y_u \right)^2}{N} \right] - SS - \text{остаточна сума квадратів};$$

$$SS = A \sum_{i=1}^k \left(\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u \right)^2 + D_1 \sum_{i=1}^{n_1} \left(\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u \right)^2 + b_0 \sum_{u=1}^N y_u - \sum_{i=1}^k b_{ii} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - \frac{\left(\sum_{u=1}^N y_u \right)^2}{N}$$

сума квадратів, пов'язана з отриманими коефіцієнтами регресії.

Обробка результатів експериментальних даних

Проведемо регресійного аналізу результатів однофакторного експерименту з використання системи STATISTICA. Зазначимо, що задача регресійного аналізу полягає в тому, щоб за дослідженнями вхідного (X) і вихідного (Y) параметрів:

- побудувати регресійну модель (рівняння регресії), тобто оцінити параметри моделі (коефіцієнти рівняння) найкращим чином;
- побудувати довірчі інтервали для коефіцієнтів моделі;
- перевірити гіпотезу значущості коефіцієнтів рівняння регресії;
- оцінити ступінь адекватності моделі і т.д.

Очевидно, що величина крутного моменту залежить від кроку шнека, тому залежною змінною (критерієм) Y є крутий момент, а незалежною змінною (фактором) X – крок шнеку.

Проведення регресійного аналізу відбуватиметься у кілька етапів. Побудуємо діаграму розсіювання експериментальних даних та графік для підгонки моделі оцінювання (та графіки з довірчим інтервалом 0,95) (рис. 3.2).

Із аналізу дослідних даних, розміщених на графічному відображенні результатів, робиться висновок про можливість побудови поліноміальної регресійної моделі другого порядку.

$$(v_2 = b_0 + b_1 * v_1 + b_2 * v_1^2).$$

В якості методу оцінювання виберемо загальноприйнятій для технічних систем – квазіньютонівський. В методах нелінійного оцінювання важливо вірно підібрати початкові наближення.

Невідомими параметрами моделі є коефіцієнти b_0 , b_1 , b_2 . Натиснувши клавішу «Start values», відображається діалогове вікно, у якому потрібно ввести початкові значення, що отримані на основі попереднього графічного аналізу даних. Після дисперсійного аналізу отримуємо, уточнені значення коефіцієнтів b_0 , b_1 , b_2 (рис.3.3.) та графік результуючої регресійної кривої, накладеної на дослідні дані (рис.3.4).

N=18	b_0	b_1	b_2						
Оцінка	4.7679999547679	-0.6519006492143	0.02379056617104						

Рисунок 3.3 – Результати розрахунку коефіцієнтів регресійної моделі

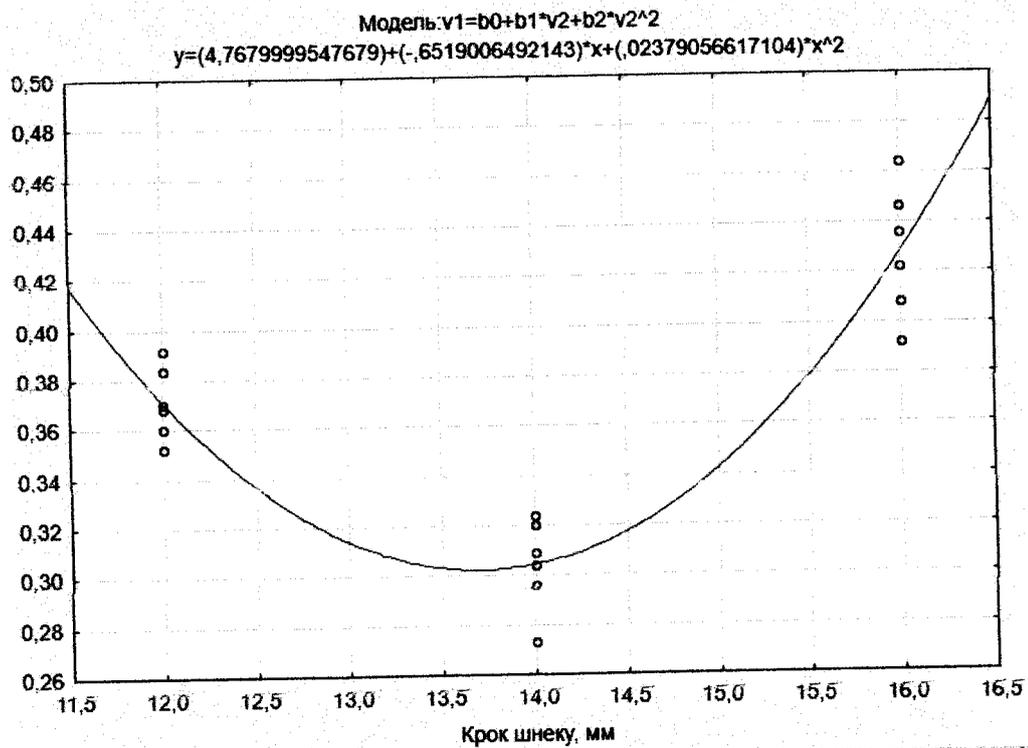


Рисунок 3.4 – Графік результуючої регресійної кривої, накладеної на дослідні дані

Тоді рівняння 3.14 можна переписати у вигляді

$$M=4.768-0.6519k+0.023791k^2, \quad (3.15)$$

де M – крутний момент, Нм;

K – крок шнеку, мм.

З метою перевірки достовірності отриманого рівняння визначимо залишки, які отримані в результаті різниці між даними спостережень та результатами розрахунків за рівнянням 3.15 (рис. 3.5, 3.6).

Модель: $v1=b0+b1*v2+b2*v2^2$			
Зал. Змінна. : Крутний момент, Нм			
	Дані спостереження, Нм	Результати розрахунків за	Залишки
1	0,370000	0,371034	-0,001034
2	0,360000	0,371034	-0,011034
3	0,352000	0,371034	-0,019034
4	0,384000	0,371034	0,012966
5	0,368000	0,371034	-0,003034
6	0,392000	0,371034	0,020966
7	0,320000	0,304342	0,015658
8	0,304000	0,304342	-0,000342
9	0,296000	0,304342	-0,008342
10	0,324000	0,304342	0,019658
11	0,309000	0,304342	0,004658
12	0,273000	0,304342	-0,031342
13	0,436000	0,427975	0,008025
14	0,392000	0,427975	-0,035975
15	0,446000	0,427975	0,018025
16	0,464000	0,427975	0,036025
17	0,408000	0,427975	-0,019975
18	0,422000	0,427975	-0,005975

Рисунок 3.5 – Розрахунок залишків між експериментальними даними та за отриманим рівнянням регресії

	1 Крутний момент, Нм	2 Крок шнеку, мм
1	0,37	12
2	0,36	12
3	0,352	12
4	0,384	12
5	0,368	12
6	0,392	12
7	0,32	14
8	0,304	14
9	0,296	14
10	0,324	14
11	0,309	14
12	0,273	14
13	0,436	16
14	0,392	16
15	0,446	16
16	0,464	16
17	0,408	16
18	0,422	16

Рисунок 3.7 – Вибіркові дані

Факторною змінною є «Крок шнеку», а результуючою – «Крутний момент». Для їх введення потрібно натиснути клавішу «Variables» у вікні установки змінних та опцій аналізу та вибрати відповідні змінні у вікні аналізу.

Наступний етап передбачає вибір рівня значущості «Significance level», який задаємо рівним $\alpha=0,05$ і натискаємо клавішу «All effects».

При цьому відкривається вікно з результатами розрахунку компонентів варіації і перевірки гіпотези впливу фактору на результат з використанням статистики Фішера. Проаналізуємо отримані результати (рис. 3.8). Під час аналізу результатів рядок «Intercept» (Вільний член рівняння) не враховуємо.

Ефект	Сума квадратів, SS	Ступінь свободи свободи	Середній квадрат, MS	Критерій Фішера	Ймовірність, p
Вільний член рівня	2.434689	1	2.434689	5868.291	0.00
Крок шнеку, мм	0.045974	2	0.022987	55.405	1.18E-7
Помилка	0.006223	15	0.000415		

Рисунок 3.8. – Вікно результатів однофакторного дисперсійного аналізу

Розраховали компоненти «Сума квадратів» (SS) 0,045974 і 0,006223 загальної варіації, яка обумовлена фактором «Крок шнеку» і неврахованими факторами. Відбулося визначення числа ступенів вільності («Degr. of Freedom») кожного компоненту. Зокрема, для компоненту варіації, що обумовлений факторною змінною, число ступенів вільності $(m-1)=2$, а для компоненту, обумовленого неврахованими факторами, число ступенів вільності дорівнює $m(n-1)=15$.

Розрахована величина «Середній квадрат» («MS»)

$$Q_1^2 / (m - 1) = 0.022987$$

$$Q_2^2 / m(n - 1) = 0.000415$$

Розраховали величину критерію Фішера, яка дорівнює:

$$F = \frac{Q_1^2 / (m - 1)}{Q_2^2 / m(n - 1)} = 55,405$$

При цьому система визначила ймовірність $p=0,0000000118$ того, що при справедливості нульової гіпотези ($F > F_\alpha$ – розрахункове значення; F_α – критична межа розподілу Фішера при рівні значущості) величина α може приймати такі ж, чи більші значення. Оскільки ця ймовірність суттєво менша рівня значущості $\alpha=0,05$, то гіпотеза про вплив фактора «Крок шнеку» на значення крутного моменту є істинною.

Висновки

Основною метою цієї роботи було розроблення системи 3D-друку на основі екструзії, яка дозволяє тестувати різні суміші для друку в різних діапазонах без використання дорогого обладнання, такого як роботизовані руки.

В процесі роботи було розроблено модель екструдера та роздрукована і з PLA пластику робоча конструкція.

Результати цієї роботи розкривають можливості розробленого екструдера та системи позиціонування для друку повного спектру різних матеріалів. Крім того, запропонований екструдер може стискати свіжу цементну або гіпсову суміш під час процесу екструзії, що призводить до ущільнення друкованого об'єкта і, відповідно, зменшення різниці у пружній та компресійній міцності між друкованими та традиційно відливними зразками в затверділому стані.

За допомогою розробленої системи 3D-друку та обладнанням його приводами які забезпечать його прямолінійний рух в майбутньому можна буде успішно надруковано середньомасштабний об'єкт без будь-яких розривів і обвалень. Оптимізовані параметри друку включають: розмір сопла 12 мм, швидкість руху суміші 10 мм/с, висоту шару 10 мм

Проведений регресійний аналіз експериментальних даних. Отримано залежність між кроком шнеку та потрібним крутним моментом. Дана залежність дозволяє знаходити потрібний крутний момент, для приведення в дію шнеку, в залежності від зміни кроку шнеку. Проведено дисперсійний аналіз та встановлено, що за критерієм Фішера розрахована ймовірність суттєво менша рівня значущості $\alpha=0,05$, то гіпотеза про вплив фактору «Крок шнеку» на значення крутного моменту є істинною.

					ГМтаМ.601мММ.004-00.00.000 ПЗ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат			
Розроб.	Жила				Літ.	Лист	Листів
Перев.	Коробко			22.12	Н		
Керівн.					Висновки Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Н. контр.	Васильєв			22.12			
Зате.	Орисенно			1901			

Список літератури

1. D. Delgado, P. Clayton, W.J.O. Brien, C. Seepersad, M. Juenger, R. Ferron, S. Salamone, Applications of additive manufacturing in the construction industry – a forward-looking review, *Autom. ConStruct.* 89 (2018) 110–119, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>.
2. Savytskyi M. V. 3D-printing of build objects / M. V. Savytskyi, S. V. Shatov, O. A. Ozhyshchenko // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* – Дніпро : ДВНЗ ПДАБА, 2016. – № 3. – С. 18–26.
3. V. Petrovic, J. Vicente Haro Gonzalez, O. Jord a Ferrando, J. Delgado Gordillo, J. Ramon Blasco Puchades, L. Portol es Grinan, Additive layered manufacturing: ~ sectors of industrial application shown through case studies, *Int. J. Prod. Res.* 49 (2011) 1061–1079, <https://doi.org/10.1080/00207540903479786>.
4. S. Ford, M. Despeisse, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *J. Clean. Prod.* 137 (2016) 1573–1587, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>.
5. S. Hamidreza, J. Corker, M. Fan, Automation in Construction Additive Manufacturing Technology and its Implementation in Construction as an EcoInnovative Solution, vol. 93, 2018, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>.
6. S. Ghaffar, P. Mullett, Commentary : 3D printing set to transform the construction industry, *Struct. Build.* (2018) 1–2, <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00136>.
7. A. Paolini, S. Kollmannsberger, E. Rank, Additive manufacturing in construction : a review on processes , applications , and digital planning methods, *Addit. Manuf.* 30 (2019) 100894, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>.

ГМтаМ.601МММ.004-00.00.000 ПЗ								
Зм.	Листг	№ докум.	Підп.	Дат	Список літератури	Літ.	Лист	Листів
Розроб.	Жила		<i>[Підпис]</i>			Н		
Перев.	Коробко		<i>[Підпис]</i>	22.12				
Керівн.								
Н. контр.	Васильєв		<i>[Підпис]</i>	22.12				
Затв.	Орисенко		<i>[Підпис]</i>	19.01				
						Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

8. B. Khoshnevis, Automated construction by contour crafting - related robotics and information technologies, *Autom. ConStruct.* 13 (2004) 5–19, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>.
9. F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet, Additive Manufacturing of Concrete in Construction : Potentials and Challenges of 3D Concrete Printing, 2016, p. 2759, <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>.
10. R.R.B. Khoshnevis, H. Kwon, S. Bukkapatnam, Crafting large prototypes, *IEEE Robot. Autom. Mag.* (2001) 33–42, <https://doi.org/10.1109/100.956812>.
11. R.A. Buswell, A. Thorpe, R.C. Soar, A.G.F. Gibb, Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction, *Autom. ConStruct.* 17 (2008) 923–929, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.03.001>.
12. N. Labonnote, A. Rønnquist, B. Manum, P. Rüther, Additive construction: state-of-the-art, challenges and opportunities, *Autom. ConStruct.* 72 (2016) 347–366, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>.
13. P. Shakor, S. Nejadi, G. Paul, S. Malek, Review of emerging additive manufacturing technologies in 3D printing of cementitious materials in the construction industry, *Front. Built Environ.* 4 (2019) 85, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00085>.
14. P. Shakor, S. Nejadi, G. Paul, A study into the effect of different nozzles shapes and fibre-reinforcement in 3D printed mortar, *Materials (Basel)* 12 (2019), <https://doi.org/10.3390/MA12101708>.
15. B. Zhu, J. Pan, B. Nematollahi, Z. Zhou, Y. Zhang, J. Sanjayan, Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction, *Mater. Des.* 181 (2019) 108088, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108088>.
16. W.R. Leal da Silva, H. Fryda, J.N. Bousseau, P.A. Andreani, T.J. Andersen,
17. Evaluation of early-age concrete structural build-up for 3D concrete printing by oscillatory rheometry, *Adv. Intell. Syst. Comput.* 975 (2020) 35–47,

https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3_4.

18. A. Kazemian, X. Yuan, R. Meier, B. Khoshnevis, Performance-Based Testing of Portland Cement Concrete for Construction-Scale 3D Printing, Elsevier Inc., 2019, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815481-6.00002-6>.

19. M.J. Al-Kheetan, S.H. Ghaffar, O.A. Madyan, M.M. Rahman, Development of low absorption and high-resistant sodium acetate concrete for severe environmental conditions, *Construct. Build. Mater.* 230 (2020) 117057, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117057>.

20. M.J. Al-Kheetan, M.M. Rahman, S.H. Ghaffar, M. Al-Tarawneh, Y.S. Jweihan, Comprehensive investigation of the long-term performance of internally integrated concrete pavement with sodium acetate, *Results Eng* 6 (2020) 100110, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100110>.

21. Y. Wu, B. Lu, T. Bai, H. Wang, F. Du, Y. Zhang, L. Cai, C. Jiang, W. Wang, Geopolymer, green alkali activated cementitious material: synthesis, applications and challenges, *Construct. Build. Mater.* 224 (2019) 930–949, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.112>.

22. B.B. Jindal, Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: a review, *Construct. Build. Mater.* 227 (2019) 116644, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.025>.

23. Y.H.M. Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, M. El-Zeadani, Clean production and properties of geopolymer concrete; A review, *J. Clean. Prod.* 251 (2020) 119679, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>.

24. M. Chougan, S. Hamidreza Ghaffar, M. Jahanzat, A. Albar, N. Mujaddedi, R. Swash, The influence of nano-additives in strengthening mechanical performance of 3D printed multi-binder geopolymer composites, *Construct. Build. Mater.* 250 (2020) 118928, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118928>.

25. S. Kashif, U. Rehman, Z. Ibrahim, M. Jameel, S.A. Memon, M.F. Javed, M. Aslam, K. Mehmood, S. Nazar, Assessment of rheological and piezoresistive properties of graphene based cement composites, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* (2018),

[https:// doi.org/10.1186/s40069-018-0293-0](https://doi.org/10.1186/s40069-018-0293-0).

26. M. Chougan, E. Marotta, F.R. Lamastra, F. Vivio, G. Montesperelli, U. Ianniruberto, A. Bianco, A systematic study on EN-998-2 premixed mortars modified with graphene-based materials, *Construct. Build. Mater.* 227 (2019) 116701, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116701>.

27. F. Celik, H. Canakci, An investigation of rheological properties of cement-based grout mixed with rice husk ash (RHA), *Construct. Build. Mater.* 91 (2015) 187–194, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.025>. [26] A. Bhowmick, S. Ghosh, Effect of synthesizing parameters on workability and compressive strength of Fly ash based Geopolymer mortar 3 (2012) 168–177, <https://doi.org/10.6088/ijcser.201203013016>.

28. J. Xie, J. Wang, R. Rao, C. Wang, C. Fang, Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate, *Compos. Part B.* 164 (2019) 179–190, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.067>.

29. A. Lampropoulos, A. Cundy, Effect of alkaline activator, water, superplasticiser and slag contents on the compressive strength and workability of slag-fly ash based geopolymer mortar cured under ambient temperature, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* 10 (2016) 308–312. <http://publications.waset.org/10003905/pdf>.

30. H. Alghamdi, S.A.O. Nair, N. Neithalath, Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D- printable alkali-activated fly ash-based binders, *Mater. Des.* 167 (2019) 107634, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107634>.

31. B. Panda, S.C. Paul, L.J. Hui, Y.W.D. Tay, M.J. Tan, Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment, *J. Clean. Prod.* 167 (2018) 281–288, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.165>.

32. A. Peled, S.P. Shah, Processing effects in cementitious Composites : extrusion and casting. <https://doi.org/10.1061,2003,192-199>.

					ГМмаМ 601МММ.004-00.00.000 ПЗ	Лист
						74
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

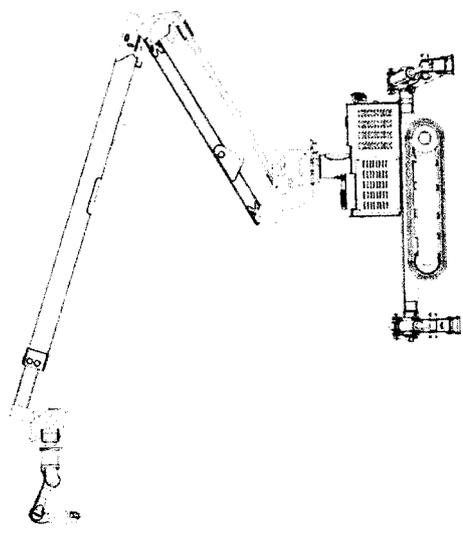
МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

**Дослідження робочих процесів обладнання
для 3D-друку будівельних конструкцій**

Виконав: студент VI курсу, групи 601-ММ
спеціальності 133 Галузеве машинобудування
Жила Ігор Валерійович
Керівник Д.т.н. проф. Коробко Б.О.

Полтава 2023



Рисунок—Мобільний принтер на гусеничному шасі



Рисунок – Мобільний комплекс X1 3D Printing

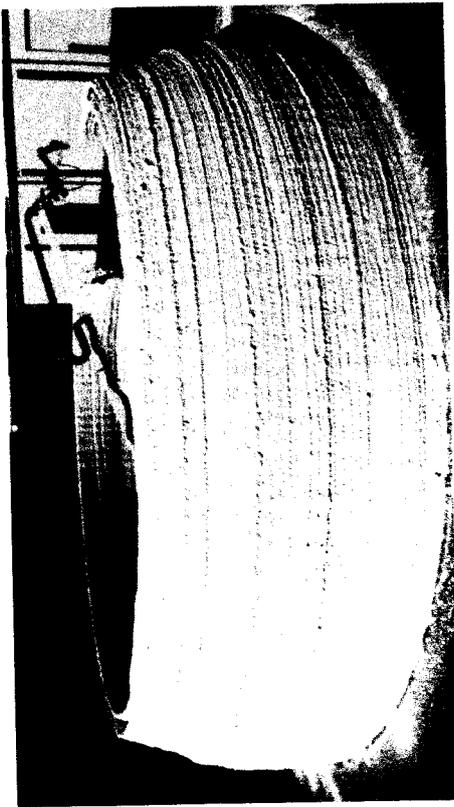


Рисунок – Піноізоляційний каркас будівлі



Рисунок – Перевезення мобільного 3D Printing

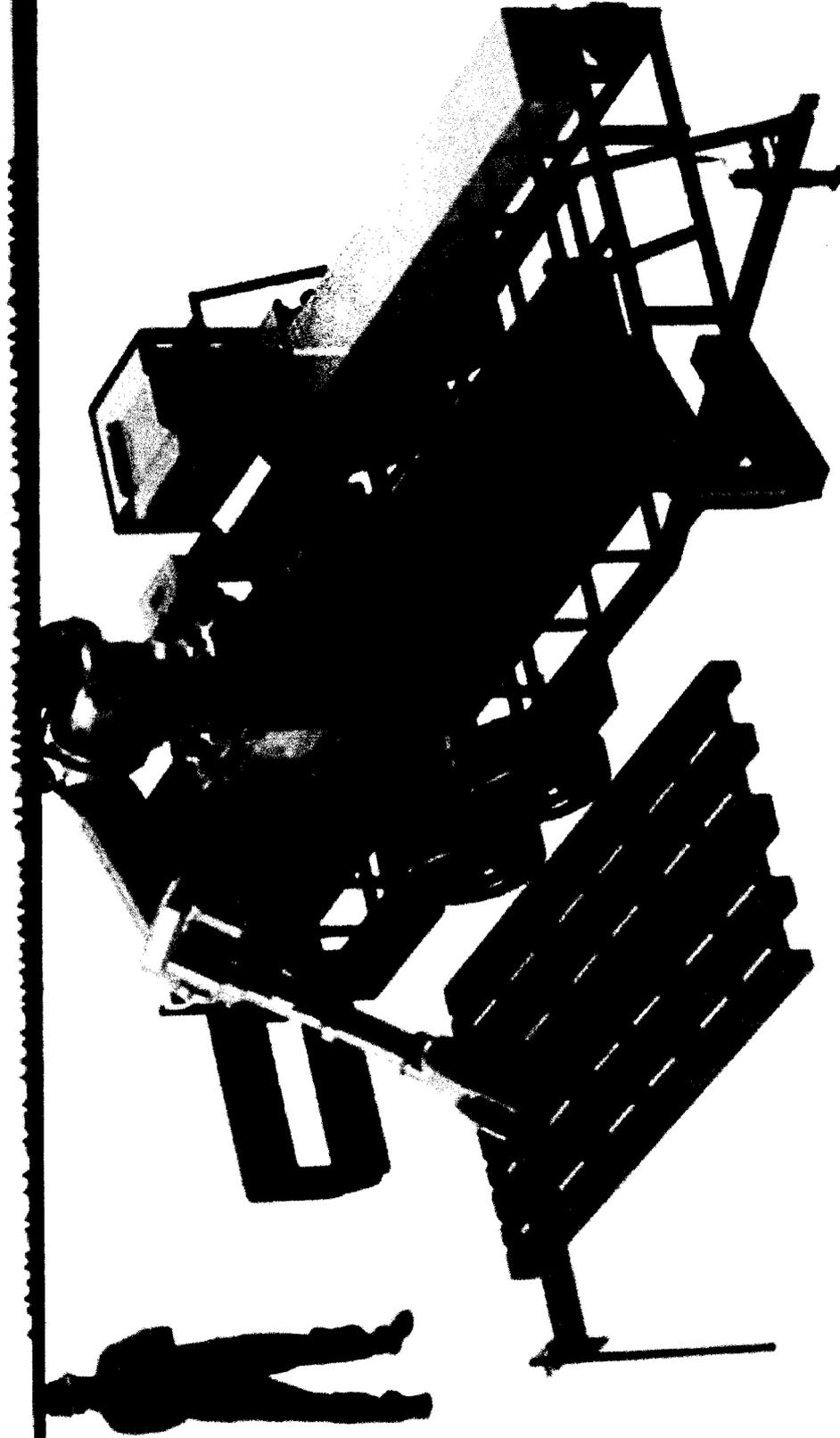


Рисунок – Прицеп з універсальною роботизованою рукою маніпулятором.



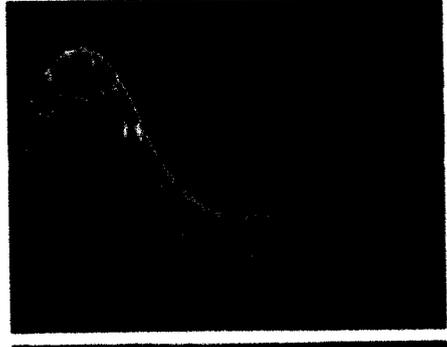
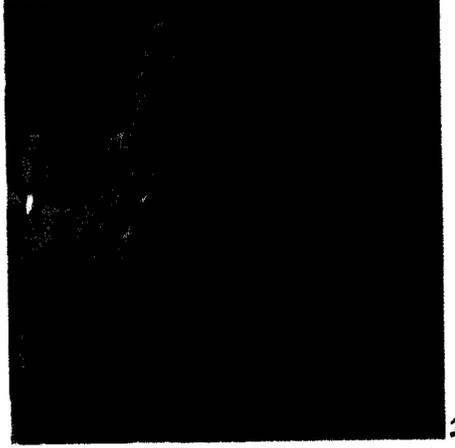
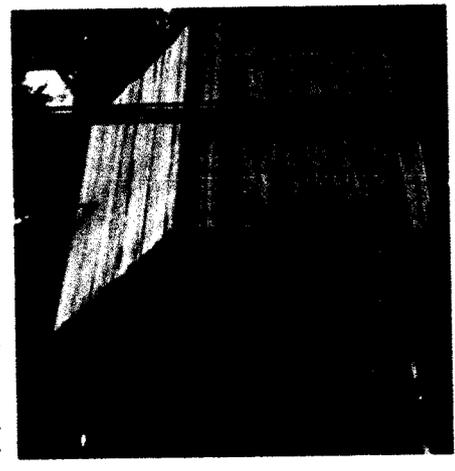
Рисунок – Використання процеси аддитивного виробництва для створення бетонних структур шар за шаром



Рисунок – Одинарний екструдер



Рисунок – Здвоєний екструдер



а) будинок, б) парковий елемент с) криволінійна стіна

Рисунок – Приклад великогабаритних об'єктів за допомогою технології D-share

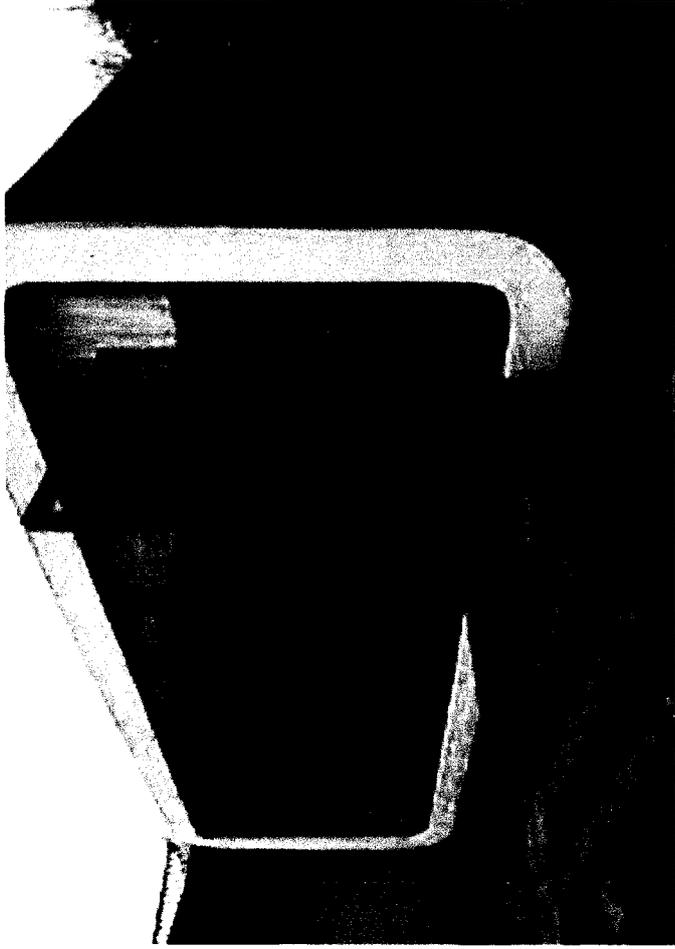


Рисунок – 3D-друк десяти будинків



Рисунок – Номер готелю на Філіппінах

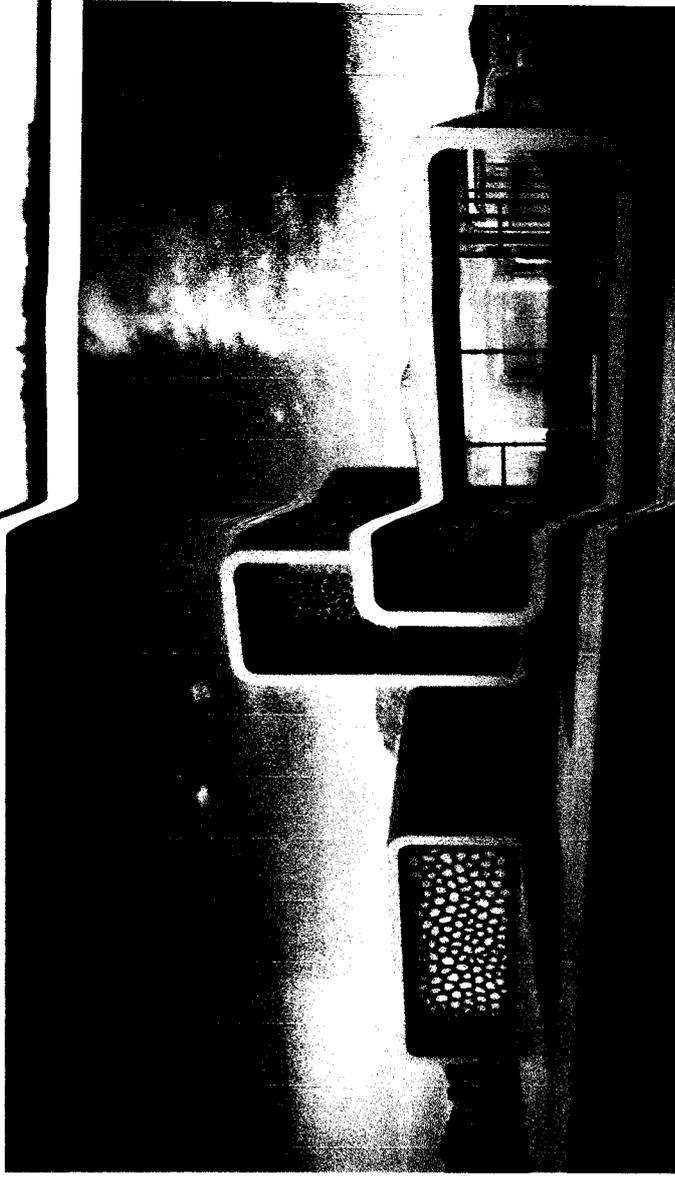


Рисунок – Перший в світі 3D

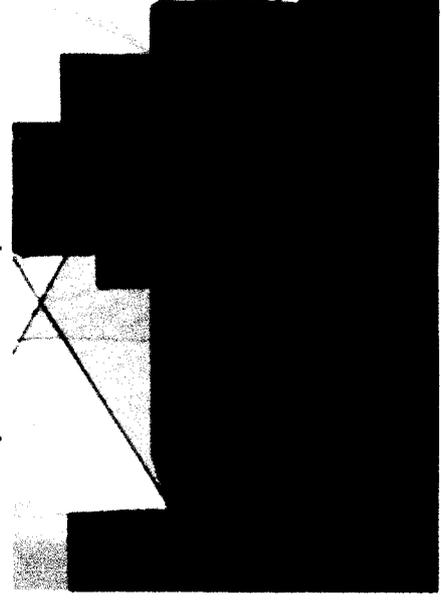
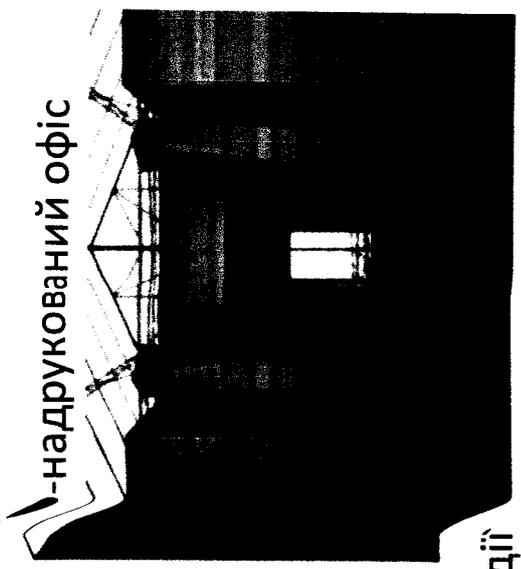


Рисунок – Сопло принтера в дії



номера готелю та завершені структури

-надрукований офіс

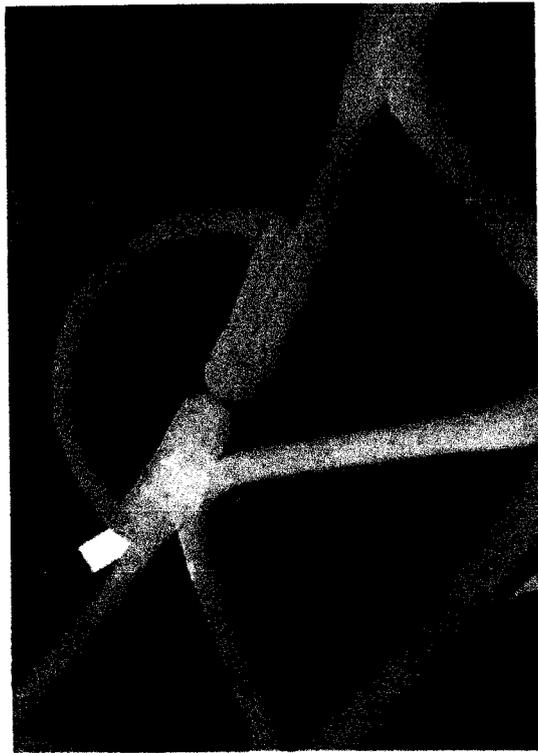


Рисунок – Фрагмент стіни з декоративними вставками

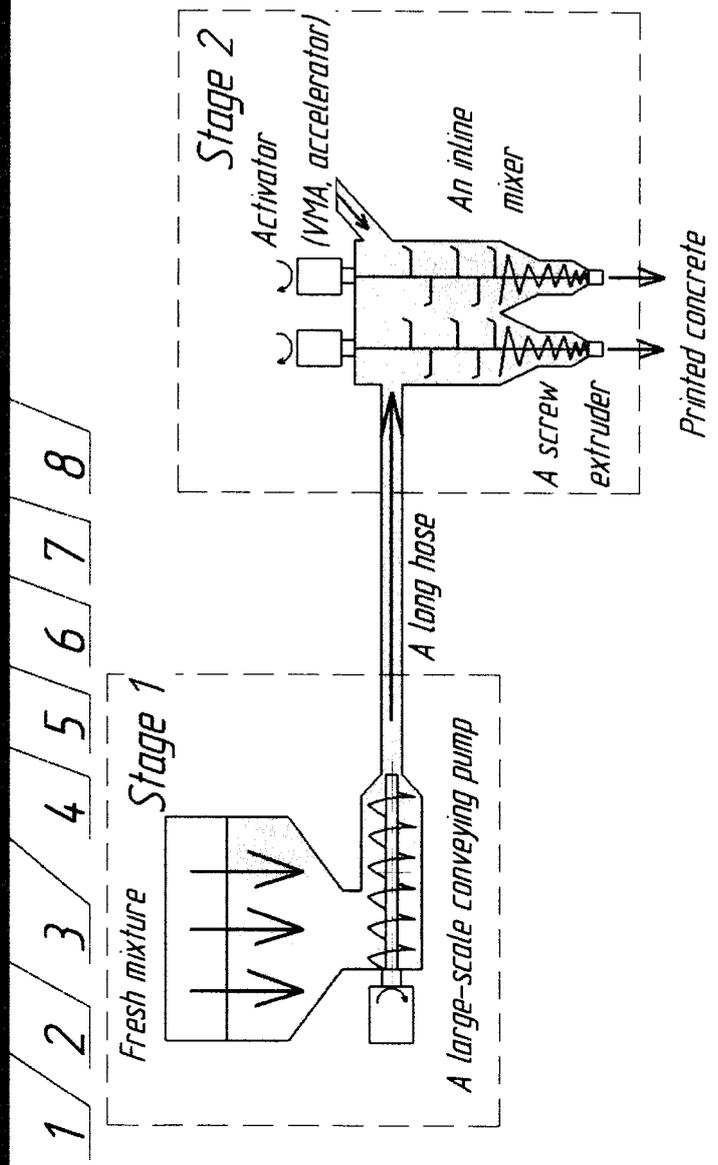


Рисунок – Надрукована стіна для захисту від повеней в місті Сучжоу

3D-принтера



- 1- тягач, 2- напівприцеп,
 - 2- 3- телескопічні виносні опори, 4- портал,
 - 3- 5- екструдер, 6- бетононасос, 7- змішувач,
 - 4- 8- роздрукований елемент.
- 3d будівельного принтера-комплексу який розміщений на базі вантажного напівприцепу**



Система подачі суміші в зону друку

1 блок приготування суміші

2 блок екструдера

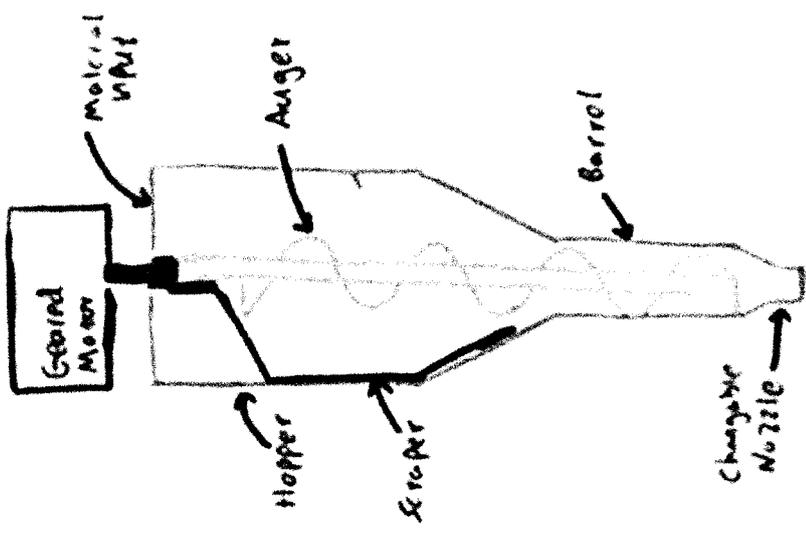


Рисунок – Ескіз системи екструзії

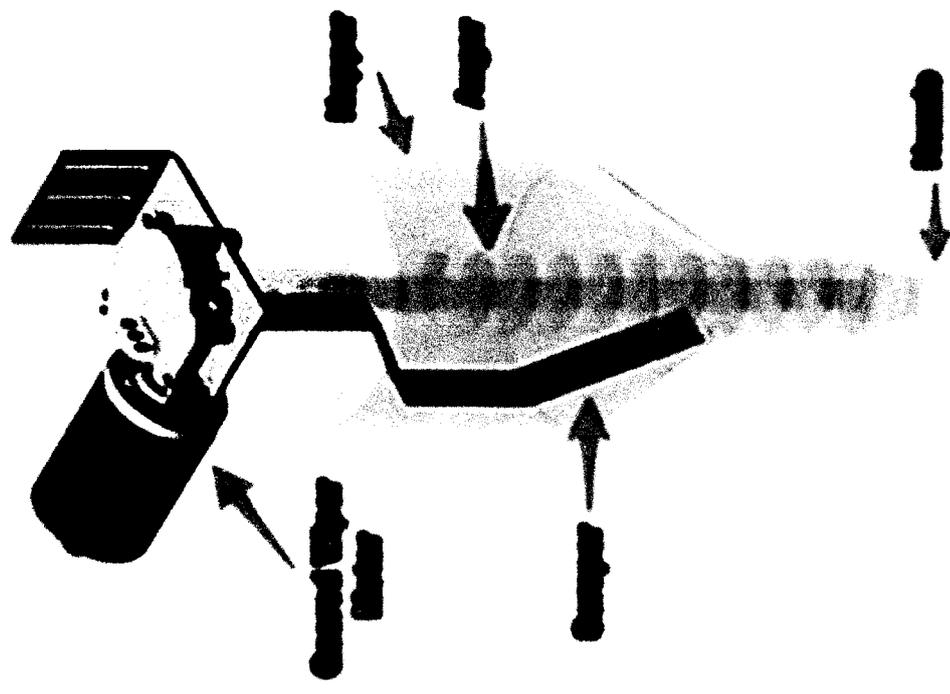


Рисунок – Конструкція екструзійного бункера

підпор конструкції екструдера

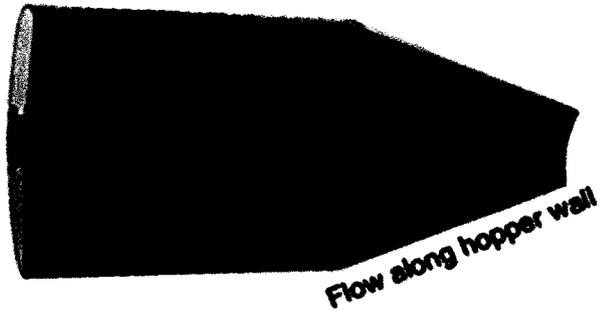
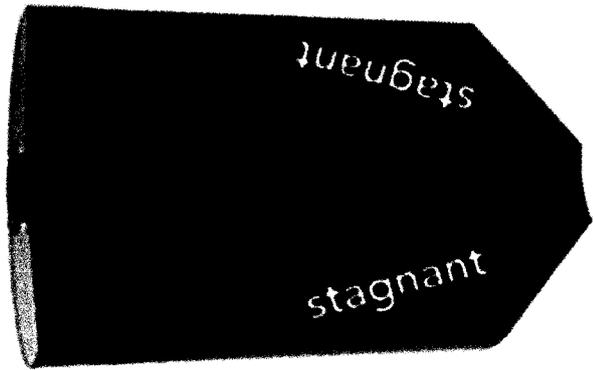


Рисунок – Кут нахилу бункера з потоком типу воронка

Рисунок – Кут нахилу бункера з масовим потоком

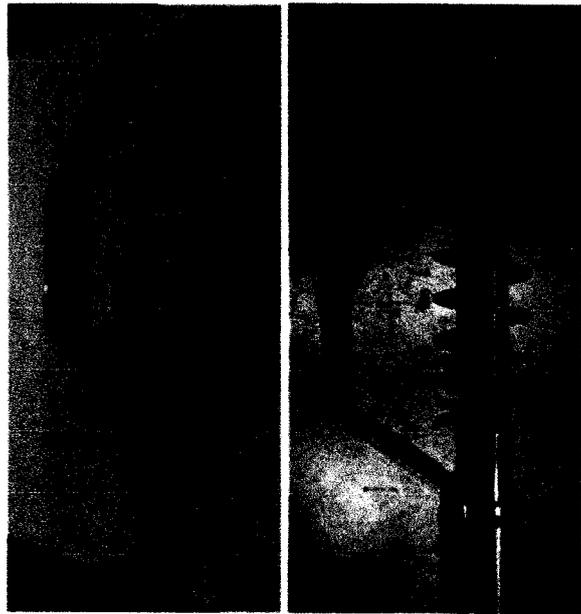


Рисунок – Конструкція шнека та шкребка

Модернізовані конструкції екструдера

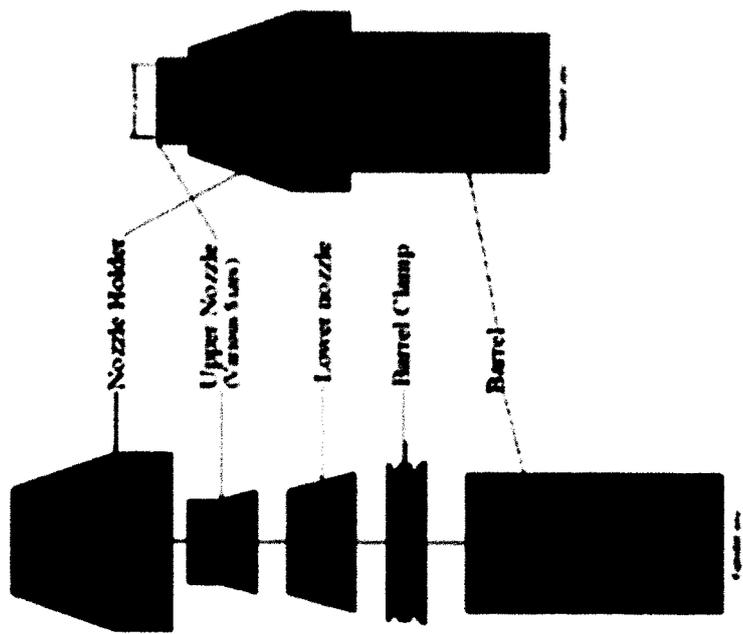


Рисунок – Надруковані зразки за допомогою форсунок різних діаметрів (a, d) за допомогою форсунок 10 мм (b, e) форсунок 15 мм та (c, f) форсунок 20 мм.

Рисунок – Форсунка – екструдер

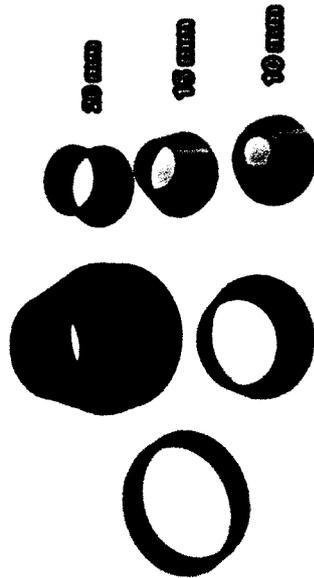
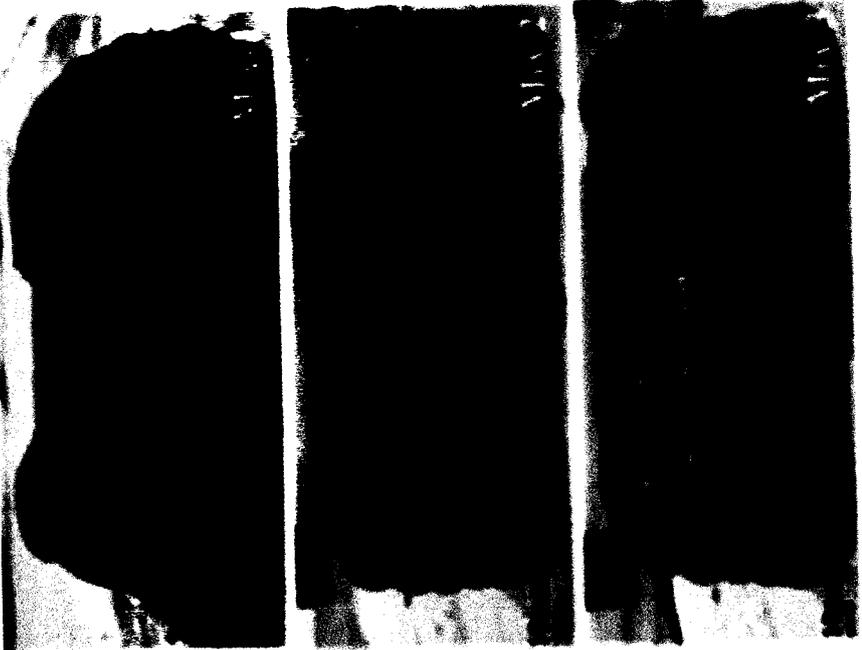
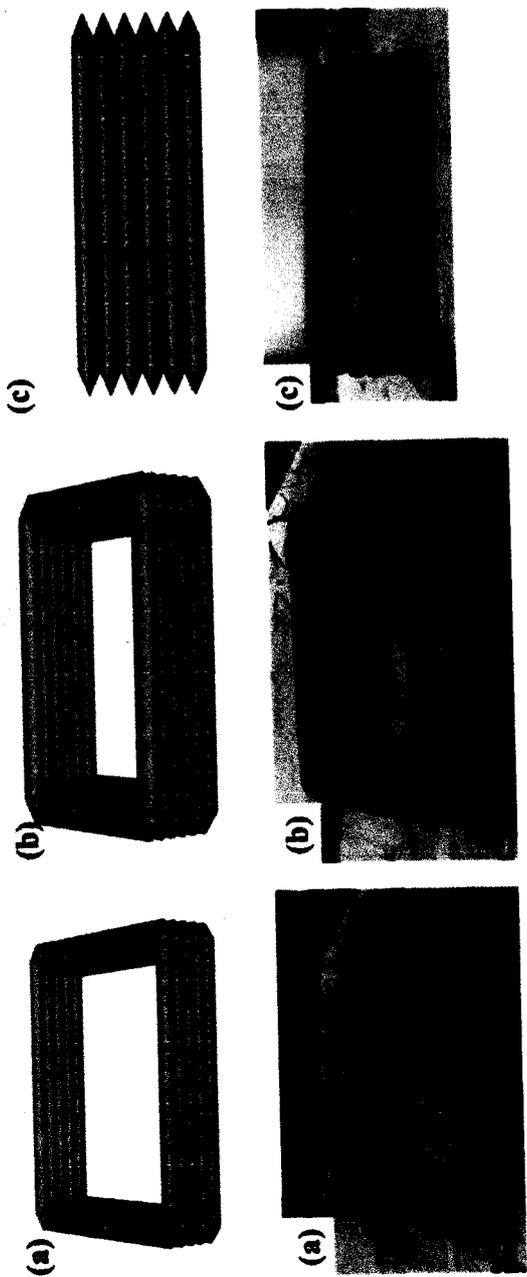


Рисунок – Змінні вставки форсунок екструдера

Підбір конструкції екструдера



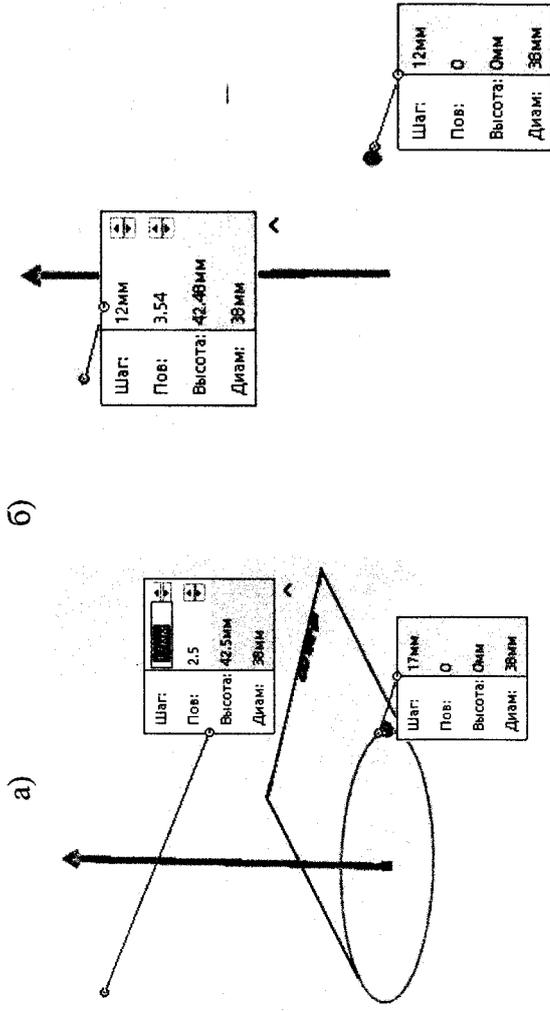
а) швидкість 30 м/с діаметр сопла 15 мм, б) швидкість 20 м/с діаметр сопла 10 мм, с) швидкість 20 м/с діаметр сопла 20 мм,

а) швидкість 30 м/с діаметр сопла 10 мм, б) швидкість 20 м/с діаметр сопла 10 мм, с) швидкість 10 м/с діаметр сопла 20

Рисунок – Надруковані зразки

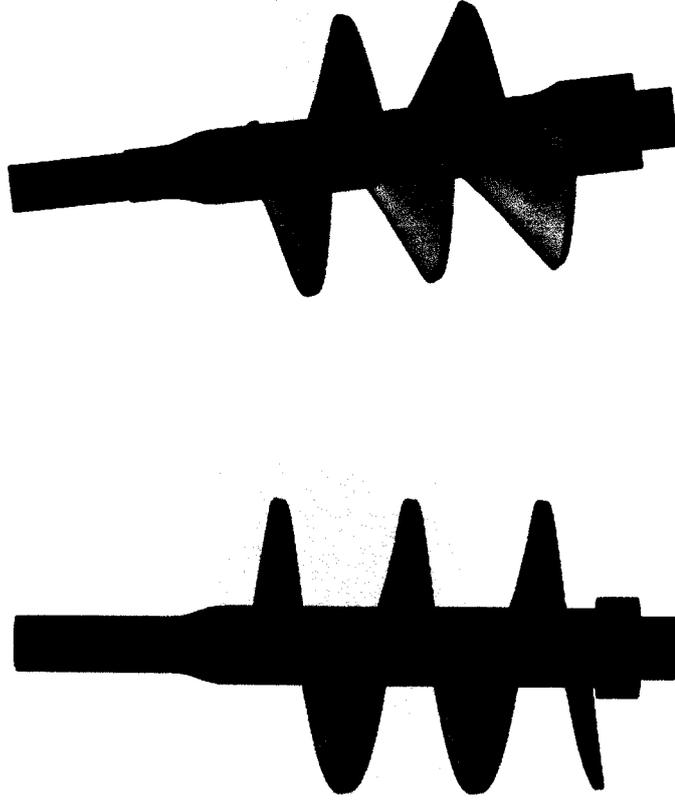
мм,

Розроблення Дослідницького зразку екструдора



а) із шагом 17 мм

б) із шагом 12 мм.



а) із шагом 17 мм б) із шагом 12 мм.

Рисунок – Спираль моделі шнека

Рисунок – 3D моделі шнека

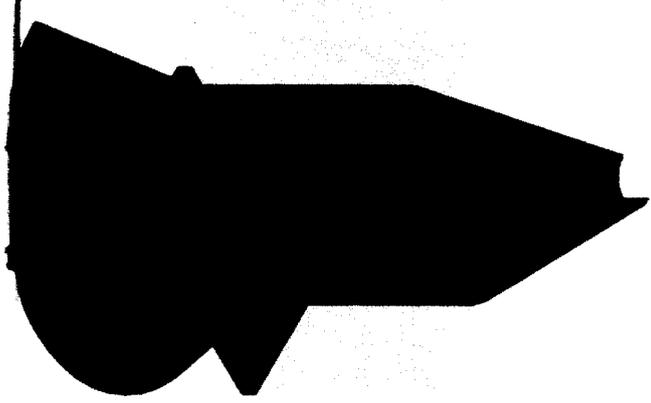


Рисунок – 3D модель бункера

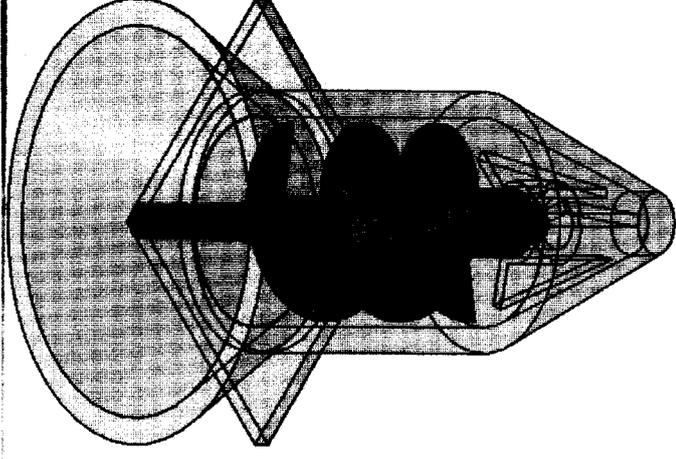


Рисунок – 3D модель експериментального пристосування

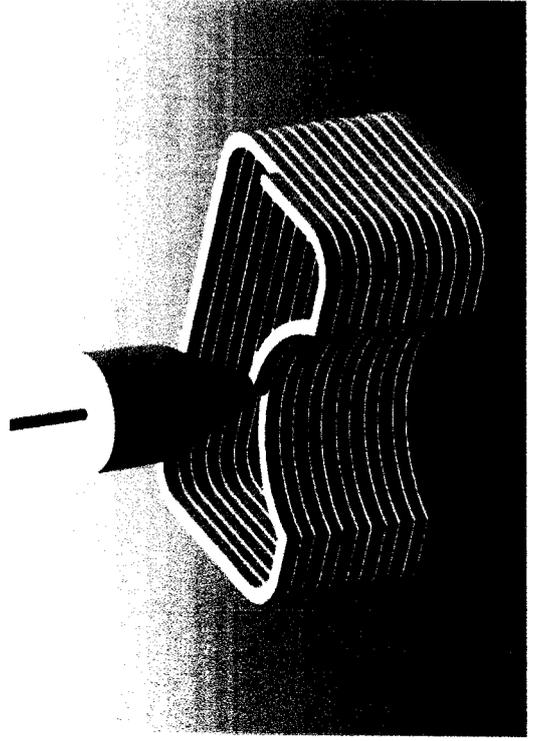


Рисунок – Схема формування слоїв будівлі

Експериментальні дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій



Рисунок – Роздруковані елементи екструдера

Таблиця 1 – Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 14 мм.

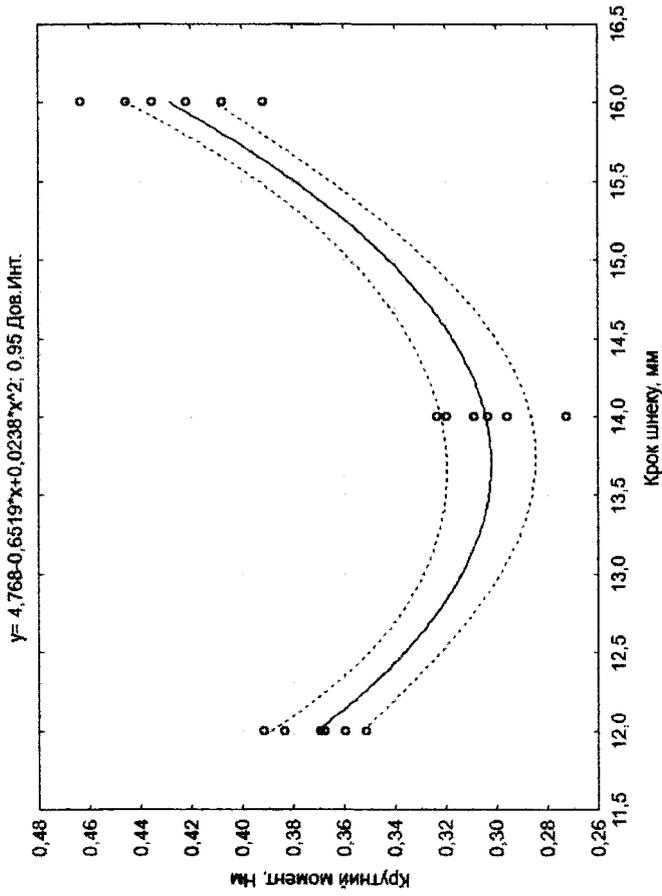
№ досліду	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	1,60	0,2	0,320	32
2	1,52	0,2	0,304	35
3	1,48	0,2	0,296	38
4	1,62	0,2	0,324	29
5	1,54	0,2	0,309	41
6	1,36	0,2	0,273	39

Таблиця 3.3 – Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 16 мм.

№ досліду	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	2,18	0,2	0,436	34
2	1,96	0,2	0,392	38
3	2,23	0,2	0,446	42
4	2,32	0,2	0,464	36
5	2,04	0,2	0,408	40
6	2,11	0,2	0,422	32

Таблиця 3.2 – Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 12 мм.

№ досліду	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	1,85	0,2	0,370	44
2	1,80	0,2	0,360	48
3	1,76	0,2	0,352	47
4	1,92	0,2	0,384	43
5	1,84	0,2	0,368	49
6	1,96	0,2	0,392	48



Рисунок– Діаграма розсіювання експериментальних даних та графік для підгонки моделі оцінювання

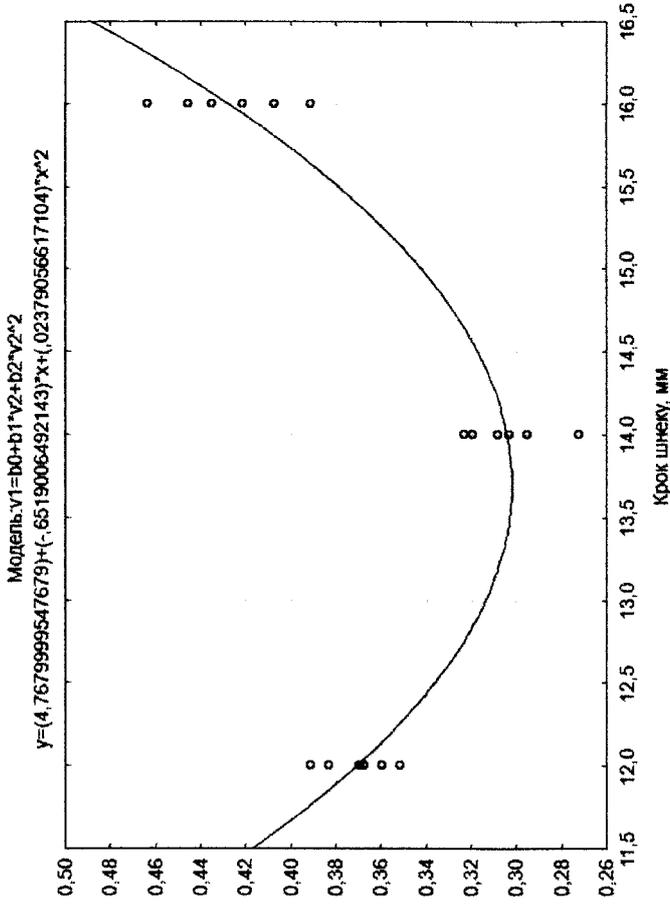


Рисунок – Графік результуючої регресійної кривої, накладеної на дослідні дані

Зал. Змінна : Крутий момент, Нм			
Дані спостереження, Нм	Результати розрахунків за	Залишки	
1	0,370000	0,371034	-0,001034
2	0,360000	0,371034	-0,011034
3	0,352000	0,371034	-0,019034
4	0,384000	0,371034	0,012966
5	0,368000	0,371034	-0,003034
6	0,392000	0,371034	0,020966
7	0,320000	0,304342	0,015658
8	0,304000	0,304342	-0,000342
9	0,296000	0,304342	-0,008342
10	0,324000	0,304342	0,019658
11	0,309000	0,304342	0,004658
12	0,273000	0,304342	-0,031342
13	0,436000	0,427975	0,008025
14	0,392000	0,427975	-0,035975
15	0,446000	0,427975	0,018025
16	0,464000	0,427975	0,036025
17	0,408000	0,427975	-0,019975
18	0,422000	0,427975	-0,005975

Рисунок – Розрахунок залишків між експериментальними даними та за отриманим рівнянням регресії

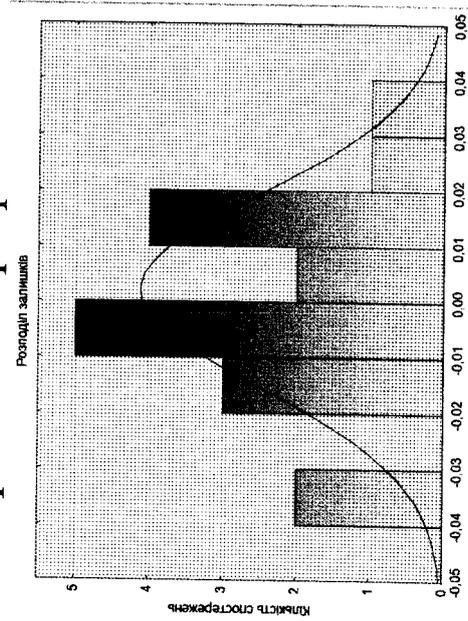


Рисунок – Розподіл залишків

Рисунок 3.2 – Діаграма розсіювання експериментальних даних та графік для підгонки моделі оцінювання

	Крутий момент, Нм	Крок шнеку, мм
1	0,37	12
2	0,36	12
3	0,352	12
4	0,384	12
5	0,368	12
6	0,392	12
7	0,32	14
8	0,304	14
9	0,296	14
10	0,324	14
11	0,309	14
12	0,273	14
13	0,436	16
14	0,392	16
15	0,446	16
16	0,464	16
17	0,408	16
18	0,422	16

Рисунок – Вибіркові дані

Ефект	Сума квадратів, SS	Ступінь свободи	Середній квадрат, MS	Критерій Фішера	Ймовірність, р
Вільний член рівн	2,434689	1	2,434689	5868,291	0,00
Крок шнеку, мм	0,045974	2	0,022987	55,405	1,18E-7
Помилка	0,006223	15	0,000415		

Рисунок – Вікно результатів однофакторного дисперсійного аналізу

ВИСНОВКИ

Основною метою цієї роботи було розроблення системи 3D-друку на основі екструзії, яка дозволяє тестувати різні суміші для друку в різних діапазонах без використання дорогого обладнання, такого як роботизовані руки.

В процесі роботи було розроблено модель екструдера та роздрукована і з PLA пластику робоча конструкція.

Результати цієї роботи розкривають можливості розробленого екструдера та системи позиціонування для друку повного спектру різних матеріалів. Крім того, запропонований екструдер може стискати свіжу цементну або гіпсову суміш під час процесу екструзії, що призводить до ущільнення друкованого об'єкта і, відповідно, зменшення різниці у пружній та компресійній міцності між друкованими та традиційно відливними зразками в затверділому стані.

За допомогою розробленої системи 3D-друку та обладнанням його приводами які забезпечать його прямолінійний рух в майбутньому можна буде успішно надруковано середньомасштабний об'єкт без будь-яких розривів і обвалень. Оптимізовані параметри друку включають: розмір сопла 12 мм, швидкість руху суміші 10 мм/с, висоту шару 10 мм

Проведений регресійний аналіз експериментальних даних. Отримано залежність між кроком шнеку та потрібним крутним моментом. Дана залежність дозволяє знаходити потрібний крутний момент, для приведення в дію шнеку, в залежності від зміни кроку шнеку. Проведено дисперсійний аналіз та встановлено, що за критерієм Фішера розрахована ймовірність суттєво менша рівня значущості $\alpha=0,05$, то гіпотеза про вплив фактору «Крок шнеку» на значення крутного моменту є істинною.