МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

магістр
(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження будівництва експериментальних будинків у тому числі за технологією 3D принтера

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1923-мопа_
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Містобудування та об'ємно-просторова архітектура
(назва освітньої програми)
Чекос Д.А.
(ініціали та прізвище)

Керівник доц.,к.арх, Сазонова О. Ю.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент проф., к.арх, Осиченко Г. О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра міського будівництва і архітектури
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код та назва)
Освітня програма Містобудування та об'ємно-просторова архітектура

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
«05» 09 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Чекосу Дмитру Андрійовичю
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проєкту) Дослідження будівництва експериментальних будинків у тому числі за технологією 3D принтера

керівник роботи доц.,к.арх, Сазонова О. Ю.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «30» 09 2024 року № 1486-с
1 Строк подання студентом роботи 01.12.2024
2 Вихідні дані до роботи Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливість розвинення проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання для виконання обраних досліджень, об`єкт досліджень, предмет досліджень, передбачувані методи виконання досліджень
3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд. Провести порівняльний аналіз основних вертикальних несучих конструкцій на прикладі індивідуальної 2 поверхової житлової будівлі на 6 осіб та також провести аналіз організаційно-технологічних рішень.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація із результатами аналітичних обґрунтувань наукового напряму досліджень, результатами експериментальних досліджень, результати розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних методів досліджень

5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Сазонова О. Ю.		
2	Сазонова О. Ю.		
3	Сазонова О. Ю.		

6 Дата видачі завдання 01.09.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд	01.10	
2	Розділ 1	15.10	
3	Розділ 2	01.11	
4	Розділ 3	15.11	
5	Розробка графічної частини	20.11	
6	Оформлення роботи	25.11	
7	Попередній захист	01.12	

Студент _____ Чекос Д.А.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ Сазонова О. Ю.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Гребенюк І.В.
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Чекос Дмитро Андрійович. Дослідження будівництва експериментальних будинків у тому числі за технологією 3D принтера.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 - Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник О.Ю. Сазонова. Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні ЗНУ, кафедра міського будівництва і архітектури, 2024.

В роботі виконано літературний аналіз з історії розвитку будівельного 3D-друку, технології виробництва, їх різновидів та їх конструктивних особливостей. Проведено аналіз основних вертикальних несучих конструкцій на прикладі індивідуального 2-х поверхового житлового будинку на 6 осіб: 1 варіант (цегляний кістяк будівлі), 2 варіант (скелет надрукований на 3D-принтері).

Ключові слова: ОБ’ЄКТИ АРХІТЕКТУРИ , 3D-ДРУК, БУДІВЕЛЬНИЙ ПРИНТЕР, ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ, БЕТОННА СУМІШ, ЖИТЛОВИЙ БУДИНОК.

ABSTRACT

Dmytro Andriyovych Chekos. Research on the Construction of Experimental Houses, Including Using 3D Printer Technology.

Qualifying graduation thesis for obtaining a master's degree of higher education in specialty 192 - Construction and civil engineering, supervisor O.Yu. Sazonova. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebni ZNU, Department of Urban Construction and Architecture, 2024.

The work includes a literary analysis of the history of the development of construction 3D printing, production technology, their varieties and their design features. An analysis of the main vertical load-bearing structures was carried out

on the example of an individual 2-story residential building for 6 people: option 1 (brick skeleton of the building), option 2 (skeleton printed on a 3D printer).

Keywords: ARCHITECTURE OBJECTS, 3D PRINTING, BUILDING PRINTER, ENCLOSURE STRUCTURES, CONCRETE MIXTURE, RESIDENTIAL BUILDING.

ЗМІСТ

	Вступ……	8
Розділ 1	ЛІТЕРАТУРНИЙ КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З БУДІВЕЛЬНИМ АДИТИВНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ……	11
1.1	Історія створення та розвиток будівельного 3D друку…….	30
1.2	Будівельні адитивні технології……	31
1.3	Основні компанії на ринку будівельного 3D друку……..	36
1.4	Висновки літературного критичного огляду……..	44
Розділ 2	ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ПРИКЛАДІ ІНДИВІДУАЛЬНОГО 2-Х ПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ…….	45
2.1	Архітектурні рішення ……..	45
2.1.1	Опис та обґрунтування зовнішнього та внутрішнього вигляду об'єкта капітального будівництва……..	45
2.1.2	Обґрунтування прийнятих об'ємно-планувальних та архітектурно-мистецьких рішень……	48
2.2	Протипожежні заходи……...	50
2.3	Теплотехнічний розрахунок будівельних конструкцій…….	50
2.3.1	Розрахунок 3-х шарової конструкції стени……	50
2.3.2	Розрахунок горищного перекриття…….	53
2.4	Вплив адитивних технологій на об'ємно-планувальні рішення будівлі……	54
2.5	Теплотехнічний розрахунок багатошарової конструкції стіни, надрукованої будівельним 3D принтером……..	55
2.6	Опис та обґрунтування конструктивних рішень будівлі……..	59
2.7	Розрахунок несучого цегляного простінка…….	61
2.7.1	Вибір матеріалів, їх розрахункові характеристики……...	61

2.7.2 Розрахункова схема, збирання навантажень, визначення зусиль 61
2.7.3 Перевірка несучої здатності простінка……... 67
2.8 Розрахунок стіни із застосуванням адитивних технологій у будівництві…… 68
2.8.1 Конструкції прийнятої стіни під час використання будівельного 3D принтера……... 68
2.8.2 Вибір матеріалів, їх розрахункові характеристики……... 68
2.8.3 Розрахункова схема, збирання навантажень, визначення зусиль 69
2.8.4 Конструкції стін при використанні 3D принтера…….. 71
2.9 Порівняння фундаменту надрукованого на будівельному 3D принтері та збірного стрічкового фундаменту…….. 73
2.10 Висновки щодо порівняльного аналізу основних вертикальних несучих конструкцій……. 73
Розділ 3 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ…….. 74
3.1 Аналіз застосовуваних складів для пошарового укладання бетонної суміші будівельним 3D-принтером……. 74
3.2 Підбір складу для будівельного 3D-принтера…… 81
3.3 Технологічна карта на зведення вертикальних несучих конструкцій із застосуванням адитивних технологій……... 83
3.4 Висновки щодо організаційно-технологічних рішень……. 86
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ…… 87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….. 88

ВСТУП

Актуальність дослідження. Будівництво із застосуванням 3D-технологій стає все більш актуальним завдяки низькій вартості житла, високій безпеці виробничих процесів і швидкому темпу зведення будівель. Технологія дозволяє створювати будівлі майже будь-якої форми, що розширює її архітектурні можливості.

Переваги використання 3D-друку в будівництві включають:

- високу точність і швидкість робіт;
- простоту експлуатації обладнання;
- відносно невисоку вартість будівель і споруд;
- мінімізацію ручної праці;
- підвищення рівня безпеки праці.

Прогрес у будівельній галузі постійно рухається вперед, і 3D-друк стає однією з найбільш перспективних інновацій. За короткий час ця технологія привернула увагу багатьох провідних будівельних компаній. Водночас її широке застосування супроводжується рядом проблем:

1. Відсутність нормативної бази. Нині бракує стандартів і законодавства, які б регулювали будівництво за допомогою 3D-принтерів. Це обмежує застосування технології у масовому будівництві, а великі компанії не поспішають інвестувати у придбання принтерів. На даний момент технологія переважно використовується для малоповерхового житла, малих архітектурних форм і дрібномасштабного індивідуального будівництва.

2. Висока вартість обладнання. На початкових етапах впровадження інноваційні технології часто мають значну ціну. З часом, коли їхня ефективність підтверджується, вони стають доступнішими, а вартість обладнання знижується.

3. Особливі вимоги до будівельного майданчика. Для роботи 3D-принтера потрібна рівна поверхня для встановлення напрямних рейок. Крім

того, важливо забезпечувати їхню паралельність, що є необхідною умовою для досягнення високої точності друку.

4. Обмеження габаритів будівель. Розміри принтера обмежують можливі розміри будівель, що можна зводити за допомогою цієї технології.

5. Відсутність універсальної суміші. Різні виробники використовують власні рецептури бетонних сумішей, експериментуючи з компонентами та їх пропорціями, що ускладнює стандартизацію.

6. Високі вимоги до бетонних сумішей. Для друку необхідно забезпечити баланс між плинністю, щоб матеріал не застоювався в соплі, і швидким схоплюванням, щоб підтримувати стабільність нанесених шарів. Це створює складнощі у підборі добавок, таких як пластифікатори, які можуть уповільнювати твердіння, тоді як шарування вимагає швидкого застигання.

7. Обмеження за сезонністю. Будівництво за допомогою 3D-принтера переважно можливе в теплу пору року. У зимовий період будівництво ускладнюється через низькі температури, що вимагає використання спеціальних опалюваних наметів для забезпечення умов роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є оцінка можливості будівництва експериментальних будинків за технологією 3D принтера.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є елементи технології 3D друку.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є оцінка можливості застосування технології будівельного 3D друку під кліматичні умови України, елементи технології 3D друку, бетонна суміш для будівельних 3D принтерів, склади та компоненти бетонних сумішей для будівельних 3D принтерів.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися узагальнення, аналіз теоретичних та практичних досліджень на тему роботи та комплексні дослідження експлуатаційних властивостей фасадних панелей.

Наукова новизна одержаних результатів. Запропоновано добавки, що

покращують властивості бетонної суміші для будівельного 3D принтера. Виявлено в ході аналітичного порівняння 3D друку стін оптимальну конструкцію стіни. Виявлено, що при порівнянні техніко-економічних показників будівництво будинків із застосуванням будівельного 3D друку економічно доцільніше традиційного будівництва.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані дані при аналізі складів та різних добавок для будівельного 3D принтера можуть бути вихідними даними для виведення більш універсального складу, який би підходив під різні кліматичні умови. Також результати виконаної роботи можуть використовуватися надалі як аналіз для написання та складання методичних рекомендацій, складання нормативної та технічної літератури для проектування будинків із застосуванням будівельного 3D друку.

Особистий вклад дослідника. Постановка мети і завдання дослідження. Збір і аналіз даних для проведення дослідження.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел, містить 95 сторінки, 20 рисунків, 26 таблиць, 74 список використаних джерел.

РОЗДІЛ 1
ЛІТЕРАТУРНИЙ КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З БУДІВЕЛЬНИМ АДИТИВНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ

Вивчення адитивних технологій у будівництві на сьогоднішній день є особливо актуальним. Існує багато сучасних робіт як вітчизняних, так і зарубіжних, що вивчають застосування адитивних технологій у будівництві.

Аналіз науково-дослідних робіт пов'язаних із застосуванням адитивних технологій у будівництві, в тому числі і за технологією 3D принтера, дозволило підтвердити актуальність подальшого дослідження, сформулювати правильно мету, завдання та наукову новизну у подальших дослідженнях. Частина розглянутих основних науково-дослідних робіт була показана в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Теоретичний огляд наукової інформації

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
1	Комишев Д. Г. , Бєлятинський А. О. / Інноваційні технології в будівництві: 3d-друк будівель, мобільні програми та штучний інтелект / 2024	Стаття містить огляд світового досвіду використання адитивних технологій у будівельній сфері на засадах використання 3D-друку будівель. Застосування 3D-друку дозволяє реалізувати архітектурні проекти будь-якої складності, зменшити обсяг виробничих відходів, скоротити дефіцит житлового фонду та знизити матеріальні, енергетичні та трудові витрати на будівництво. У статті аналізуються основні види і специфікація 3Dпринтерів, що використовуються для друку будівель та споруд, та їх відмінні характеристики. Також досліджено питання проматеріали, які застосовуються для виготовлення будівельної

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Окрема увага приділена оцінці сучасного стану 3D-друку у світі. Основними завданнями дослідження є: популяризація адитивних технологій в Україні, сприяння впровадженню інноваційних методів будівництва та розробка рекомендацій і практичних форматів використання 3D-друку будівель. [1]
2	Андрійчук О.В., Оласюк П.Я / Застосування технології 3d-друку в будівництві / 2015	У статті описано перспективи використання інноваційних технологій тривимірного друку в будівництві. Представлено переваги цієї технології над традиційними методами зведення будівель і споруд. Потреба у швидкому та дешевому будівництві змушує нас шукати нові технології та методи зведення будівель та споруд. Технологія тривимірного друку все частіше стає частиною навколишнього середовища. Такий спосіб виготовлення відрізняється високою точністю, якістю, низькою матеріальною вартістю і короткими термінами виготовлення. Розробки в цій сфері на сучасному етапі розвитку дозволяють будувати будинки незвичайної форми, втілювати різноманітні ідеї архітекторів і дизайнерів.

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Як виявилося, тривимірний друк дуже ефективний у будівлях: технологія дозволяє економити 30-60% будівельного сміття, знижує трудовитрати на 50-80% і в цілому знижує витрати на будівництво на 50-60%. Також зменшується потреба у великогабаритному підйомному обладнанні, будівельні майданчики майбутнього стануть менш шумними та чистішими. [2]
3	Згалат-Лозинська Л.О., Згалат-Лозинський О.Б. / Розвиток та впровадження інноваційних технологій 3D друку у будівництві / 2020	У статті розглянуто сучасний стан і перспективи розвитку адитивних технологій в будівельній галузі України. Проведено аналіз ринку адитивних технологій та 3D-друку в будівництві, показано, що розмір світового ринку 3D-друку проявляє сталі тенденції до зростання більш ніж на 14% у 2020–2027 рр. Визначено основні напрями розвитку адитивних технологій у будівництві. Найбільш суттєвою перешкодою на шляху до повноцінного впровадження 3D-друку у будівництві є відсутність нормативної бази його використання. Розглянуто сучасні матеріали та технології для друку будівель та об’єктів інфраструктури в різних країнах світу. Досліджено перспективи розвитку технології 3D-друку в будівельній галузі у світі та в Україні.

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Показано, що для виконання таких проєктів потрібно залучення як державної підтримки, так і приватних інвесторів, а також фінансування досліджень із розроблення та впровадження нових матеріалів та адитивних технологій. [3]
4	Струтинська О. В. / Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування / 2018	У статті розглядаються сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання й друкування, а саме: подано характеристику апаратного та програмного забезпечення функціонування зазначених технологій, етапи процесу тривимірного друкування, а також охарактеризовано галузі їх використання. Актуальність даного дослідження пов'язана з тим, що на теперішній частехнології тривимірного моделювання (3D-моделювання) та тривимірного друкування (3D- друкування) розвиваються швидкими темпами. Технології 3D-друкування з'явилися лише кілька десятків років тому, але вони динамічно розвиваються і вже використовуються в значній кількості сфер людської діяльності. Наприклад, у медицині розроблено перші 3D-принтери, за допомогою яких можна друкувати елементи для ортопедії та хірургії, і з кожним роком з’являються нові сфери застосування даних технологій, включно із друкуванням органів.

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Активніше технолвикористовуються у промисловості. Наприклад, компанія Boing вже використовує 3D-друкування для виготовлення та проектування своїх двигунів. Дослідники з Університету Саунгемптон змогли на 3D-принтері повністю виготовити безпілотний літак (дрон). Поступово технологія 3D-друкування входить до нашого життя, відкриваючи все нові можливості її використання в найрізноманітніших галузях людської діяльності. [4]
5	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 / 2018	Адитивне виробництво (АМ), також відоме як 3D-друк, виготовляє компоненти пошарово безпосередньо з цифрового файлу. Багато з ранніх застосувань технологій АМ були в аерокосмічній, автомобільній промисловості та охороні здоров'я. Спираючись на досягнення АМ у цих галузях, існує кілька експериментальних застосувань АМ у будівельному секторі. Ранні дослідження свідчать про те, що використання технологій АМ для будівництва потенційно може знизити витрати на робочу силу, зменшити відходи матеріалів і створити індивідуальні складні геометрії, яких важко досягти за допомогою звичайних методів будівництва.

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Однак ці початкові дослідження не охоплюють повного діапазону потенційних застосувань у будівництві та не використовують технології АМ, що швидко розвиваються, для різноманітних типів матеріалів. У цьому документі наведено сучасний огляд АМ у зв'язку з будівельною галуззю, визначено тенденції використання процесів АМ та матеріалів, а також обговорено відповідні методи впровадження АМ та потенційні досягнення в застосуванні АМ. Приклади потенційних удосконалень включають використання кількох матеріалів (наприклад, використання високоефективних матеріалів лише в тих областях, де вони необхідні), ремонт на місці в місцях, які є важкодоступними або небезпечними для людей, будівництво для ліквідації наслідків стихійних лих у районах з обмежена робоча сила та матеріальні ресурси для будівництва, структурні та неструктурні елементи з оптимізованою топологією та індивідуальні частини високої вартості. Майбутнє АМ у будівельній галузі багатообіцяюче, але все ще необхідні міждисциплінарні дослідження, щоб забезпечити нові матеріали, нові процеси, швидший друк.

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
6	Kamran Aghaee , Linfei Li , Alireza Roshan , Parsa Namakiaraghi / Additive manufacturing evolution in construction: From individual terrestrial to collective, aerial, and extraterrestrial applications /2024	Третя промислова революція відзначена швидким розвитком адитивного виробництва (АМ) у будівництві. Цей трансформаційний зсув стимулює автоматизацію процесів будівництва, щоб створити економічні, стійкі та функціональні середовища проживання на землі та в космосі. АМ забезпечив інноваційне маніпулювання та проектування матеріалів, архітектури та конструкцій у будівельній галузі. Можливість використання різноманітного асортименту як оригінальних, так і перероблених матеріалів, архітектура вільної форми, оптимізація топології та дизайн, натхненний біологією, точність виробництва, мінімальний час виробництва та робоча сила, ефективно просунули цілі. Це призвело до значного зниження витрат при одночасному підвищенні безпеки, стійкості та функціональності АМ у будівництві. Для досягнення цілей автоматизації в будівництві траєкторія АМ просувається від зовнішнього будівництва до будівництва на місці за допомогою масштабування, колективної роботизованої роботи, дистанційного, повітряного та місячного будівництва.

		Незважаючи на проблеми з проектуванням, пов’язані з такими факторами, як армування, з’єднання між шарами, коригування реології та стійкість до розтріскування, а також практичні міркування, включаючи вартість, гармонізовану/синхронізовану роботизовану функцію, стабільність дрона та точність нанесення, АМ досягає значних успіхів, які перевершують очікування. . У майбутньому можна спостерігати, як дрони розміром з бджолу роїться, щоб будувати споруди в різноманітних середовищах, включаючи віддалені райони на Землі та в космосі. Враховуючи ці події, у цьому дослідженні розглядається прогрес АМ у будівельній галузі, простежується його еволюція від індивідуального наземного до колективного, повітряного та позаземного будівництва. Крім того, розроблено найбільш прийнятні методи АМ, що охоплюють біологічні технології та оптимізацію топології. Обговорюються переважні матеріали та їхні характеристики для наземного, повітряного та позаземного будівництва, а також для ремонту тротуарів. Крім того, представлено відповідні методи тестування, а також з’ясовано проблеми та обмеження, пов’язані з будівництвом АМ на земних, повітряних і місячних поверхнях, з уявленнями про майбутнє АМ. [6]

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Авторами запропоновано перелік традиційних будівельних матеріалів для створення об’єктів архітектури, як-от мінеральний важкий бетон з полімерною мікрофіброю та хімічними добавками для регуляції термінів тужавіння в’яжучого, а також перспективні матеріали для будівництва, а саме: алюмоборосилікатне скло; різні види пластмас; сплави кераміки зроблені методом селективного лазерного спікання або солі як базового матеріалу для виконання складних реставраційних робіт у процесі реконструкції. Результатом здійснених теоретичних та прикладних досліджень можна вважати представлені авторами висновки щодо встановлення основних переваг застосування 3D- принтерів у створенні реальних об’єктів архітектури різного функціонального призна-чення та вибору оптимального методу 3D-друку на конкретній марці технологічного обладнання за найбільш ефективним програмним забезпеченням. У цій публікації авторами розглядаютьсярізноманітні технології та технічні засоби, їхні переваги та недоліки, а також проаналізованоосновні галузі застосування 3D-принтерів в процесі реалізації архітектурних об’єктів із визначенням

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		перспектив розвитку цієї надзвичайно ефективної технології побудови будівель та споруд. Новою епохою у світовій архітектурній практиці к. XX – поч. XXI ст. стає використання технології 3D-друку (Лунева, Кожевникова, Калошина, 2017). До того ж тривимірний друк має відношення до адитивного виробництва, тобто наведена вище технологія дозволяє створювати об'єкти архітектури шляхом нанесення послідовно одного за другим шарів будівельного матеріалу за раніше заданою шаблоном траєкторією. Виготовлені за допомогою сучасних 3D-принтерів об'єкти архітектури в процесі швидкого виробництва з'являються або вже у готовому до експлуатації вигляді чи в окремих елементах повної заводської готовності, які потім монтуються в проєктованому положенні у складі конкретного будівельного об'єкту. [7]
7	С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. І. Голубченко О. І. та ін. / Дослідження варіантних рішень обладнання для 3D-друку будівел ьних виробів овацій / 2022	До інноваційних технологій у будівництві належить 3D-друку об'єктів різного призначення. В основі технології 3D-друку лежить принцип пошарового створення твердої моделі. Ця технологія базується на використанні будівельних 3D-принтерів, які за призначенням поділяються на принтери, що друкують будівлю повністю, і принтери, які створюють окремі

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		конструктивні елементи для монтажу об’єктів. За конструкцією 3D-принтери бувають прогінного типу (головним чином у вигляді мостових конструкцій) та з консольним виконанням робочого обладнання у вигляді маніпуляторів. Принтери мостового типу дозволяють отримати більш якісні вироби за рахунок точного позиціювання робочого обладнання, у першу чергу екструдера, яким безпосередньо подається суміш. За короткий час розвитку 3D-друку в будівництві (15…16 років) створено значну кількість різноманітних 3D-принтерів мостового типу, однак відсутні відомості з їх дослідження та порівняльного аналізу характеристик, що дозволить удосконалити їх конструкцію для підвищення якості зведення об’єктів. Мета − порівняльний аналіз характеристик та показників роботи варіантних конструкцій 3D-принтерів мостового типу. Результати дослідження. На підставі аналізу варіантів виконання принтерів розроблено удосконалений 3D-принтер у вигляді мостової конструкції з екструдером із двома вихідними отворами. Це дозволяє значно підвищити продуктивність виготовлення виробів. Розглянуто різні типи будівельних 3D-принтерів мостового типу, які мають недоліки та вимагають удосконалення. [7]

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
8	Савицький М. В., Конопляник О. Ю., Мислицька А. О., Лясота О. М. / Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3D-друку будівельних конструкцій / 2020	Наразі все більшої популярності набувають методи виготовлення будівельних конструкцій та виробів за допомогою 3D-принтера. В технології 3D-друку один з основних факторів, який впливає на якість кінцевої продукції, − це склад бетонної суміші, яка застосовується. При цьому для кожного з виду виробів важливо розробити окремий склад суміші, яка володіє певними фізико-механічними властивостями. Аналіз сучасного стану розроблення і дослідження бетонів для 3D-друку конструкцій показав, що вибір матеріалів для друку залежить від функціонального призначення створюваного об’єкта та сфери його застосування. При цьому відмінна особливість бетонів, які застосовуються в практиці сучасного будівництва, полягає в тому, що кожен розробник 3D-принтера представляє свою суміш, не розкриваючи її складу. Аналіз публікацій. Основний матеріал у 3D-будівництві, − це бетон − штучний кам’яний будівельний матеріал, отримуваний в результаті формування і затвердіння раціонально підібраної і ущільненої суміші. Така суміш складається з в’яжучої речовини − цементу, великих і дрібних заповнювачів, води, а в деяких випадках і різноманітних модифікувальних добавок.

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Це каолінова глина, мікрокремнезем, повітряне вапно, летючий попіл, суперпластифікатори, прискорювачі твердіння та набору міцності суміші. У світовій практиці для 3D-друку конструкцій для армування бетону в склад суміші вводять різноманітну фібру, скловолокно та інші наповнювачі, які дозволяють значно підвищити міцність бетону. Нині в Дніпропетровській області в с. Братське у виробничому приміщенні налагоджено випуск дрібноштучних бетонних виробів за допомогою 3D-друку. Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» налагодила співробітництво з цим виробництвом, яке стосується удосконалення технології виготовлення і нанесення сумішей, а також розроблення оптимальних складів бетонів. Першим кроком такого співробітництва стало розроблення складів сумішей з різними в'яжучими і прискорювачами твердіння, які суттєво впливають на скорочення термінів тужавлення. [8]
9	Шатов С. В., Савицький М. В., Марченко І. О. /	Різні сфери виробництва застосовують інноваційні будівельні технології, направлені на поліпшення якості житла та

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
	Удосконалення обладнання 3D-друку об’єктів / 2019	зменшення його вартості, зведення сучасних промислових споруд. Ці технології передбачають практичне використання досягнень в ІТ-сфері, які забезпечують новітній напрямок у розвитку будівельних кластерів і розробленні стартапів. До таких технологій належать 3D-друку об’єктів різного призначення. 3D-друку – це процес відтворення реального об'єкту за зразком 3D-моделі. В основі технології 3D-друку лежить принцип пошарового створення твердої моделі. 3D-принтер дозволяє виводити тривимірну інформацію, тобто створювати певні фізичні об'єкти. У будівництві 3D-друку вимагає створення технологій, матеріалів, ефективного обладнання, нормативної бази.Мета дослідження – розвиток інноваційної технології 3D-друку в будівництві для створення новітніх стартапів у цій галузі.Результати дослідження. Інноваційний проект 3D-друку будівельних об'єктів пов'язаний з удосконаленням обладнання.Розроблено 3D-принтер у вигляді мостової конструкції з поворотним маніпулятором та різні види головок 3D-принтерів: з декількома екструдерами, встановленими на різних рівнях; з рухомим середнім екструдером для укладання елементів

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		жорсткості між зовнішніми та внутрішніми стіновими конструкціями будівель; з можливістю регулювання параметрів шарів сировини, що укладається. Інноваційні будівельні технології, зокрема, 3D-друку об'єктів, направлені на поліпшення якості житла та зменшення його вартості, зведення сучасних промислових споруд. Розглянуто різні типи будівельних 3D-принтерів, які мають недоліки та вимагають удосконалення. Розроблено перспективні конструкції 3D-принтерів та їх складових частин, які передбачають розширення технологічних властивостей обладнання та підвищення продуктивності. [9]
10	Wolfs R. J. M., Boss F. P., Salet T. A. M./ Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. Cement and Concrete Research / 2019.	Технологія 3D Concrete Printing (3DCP) стрімко прогресувала за останні роки. З метою реалізації як будівель, так і будівельних робіт зростає потреба в надійних механічних властивостях друкованого бетону. Як наслідок технології адитивного виробництва, 3D-друковані структури можуть складатися з кількох шарів, які повинні демонструвати зв'язок, щоб гарантувати безпечний структурний дизайн. У цій статті представлені результати експериментального дослідження зв'язку між параметрами процесу 3DCP та міцністю зв'язку бетону, надрукованого на 3D.

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Було встановлено вплив 3 параметрів процесу (міжшаровий інтервал часу, висота сопла та дегідратація поверхні) на дві механічні властивості (міцність на стиск і міцність на розтяг, визначені за допомогою випробувань на згинання та розколювання) у трьох перпендикулярних напрямках. Було виявлено дуже обмежений вплив орієнтації шару для даної комбінації технологічний процес-матеріал, враховуючи досить короткий проміжок часу між шарами. Однак міцність зв'язку між шарами зменшується при збільшенні інтервалів між шарами. Це також відбилося на режимі відмови зразків. Зниження міцності стало більш вираженим для зразків, які залишалися непокритими протягом інтервалу часу, підданого сушінню. Чіткого зв'язку між висотою сопла та міцністю зв'язку між шарами виявлено не було. Результати цього дослідження, у порівнянні з різними іншими роботами з 3DCP, підкреслюють необхідність стандартизації методів випробувань і характеристики 3D-друкованого бетону, оскільки окремі параметри процесу чітко повинні розглядатися у зв’язку з застосованим матеріалом та іншими параметрами процесу.[10]

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
11	Кірик, К., Журавська, Н., & Стефанович, П. / Gерспективи розвитку 3d будівництва та його вплив на навколишнє середовище / 2023	В даній наукові роботи виокремлено тему розвитку передових технологій зведення будинків за допомогою 3Д-друку. Позитивні й негативні чинники традиційного будівництва. Перехід на еко-будівництво світових лідерів. Потреби змін методики будівництва в Україні . У сучасному світі технології розвиваються з кожним роком з великою швидкістю. За останні кілька десятиліть проектування та зведення екологічних будівель набули популярності. Однією з останніх і найбільш перспективних інновацій , на наш погляд, в галузі будівництва є друкування будинків на 3D-принтерах. Це революційна технологія, яка дозволяє створювати будівлі швидко, ефективно та знижувати витрати на будівництво. Крім того, друк будинків на 3D-принтерах відкриває нові дизайнерські можливості та допомагає зменшити вплив будівництва на довкілля. Відомо, що вплив будівництва на довкілля є, як правило, шкідливим, оскільки ця галузь є одним з найбільших споживачів енергії та ресурсів, яка забруднює навколишнє середовище. Цій напрямок включає в себе багато складових, що стосується не лише експлуатації будівель, але й їхньої побудови, демонтажу та інше.

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Розглянуто детальна технологія друку будинків на 3D-принтерах, висвітлено переваги та недоліки цього методу будівництва, а також проаналізовано можливості використання цієї технології в різних галузях будівництва нашої країни зі змінами, які можуть відбутися з початком експлуатації 3Д-будинків в Україні. Прогноз вчених про розвиток демографічної ситуації в найближчі 20 років вказує на бурхливе зростання населення планети. Це може стати серйозним випробуванням для урядів багатьох країн в забезпеченні підростаючих поколінь комфортними умовами життя, в першу чергу житлом. Так, на основі даних, наведених ООН, через 15 років середньодобова потреба людства в новому житлі перевищить 100 тис. одиниць, і до 2030 року приблизно 4 млрд. осіб з малозабезпечених верств населення (з доходом менше $ 3 тис. на рік) буде мати гостру потребу в житлі. Майбутня загроза – як це відбувалося не раз, – заявляють оптимісти, буде відвернена за допомогою інноваційних технологій в будівельній галузі. Найбільш вірогідним шляхом вирішення наростаючої проблеми – стверджують фахівці – стане застосування 3D технологій: будівельних принтерів.

№ п/п	Автори / назва статті / рік публікації	Короткий опис
		Саме це рішення, на їхню думку, дозволить задовольнити швидко зростаючу потребу широких верств населення і забезпечити тих, хто гостро потребують, житлом. Оптимізм обґрунтований підтвердженнями з різних джерел: у порівнянні з традиційними технологіями використання 3D принтерів при зведенні будинків та споруд дозволить економити на затратах до 80 %, а час будівництва скоротити на 60…70 %. Головні переваги будівельних принтерів – мінімальні (в порівнянні з традиційними способами виконання робіт) терміни і ефективність логістичних операцій. Як недоліки: неможливість впровадження 3D технологій в комплексний процес будівництва, реконструкції та ремонту висока вартість сучасних моделей тривимірних будівельних принтерів [11].

Останні не введені в таблицю 1.1 науково-дослідницькі роботи та патенти, розглянуті та вказані в списку літературних джерел [12-74].

1.1 Історія створення та розвиток будівельного 3D друку

Зростання автоматизації виробництва бере свій початок у XX столітті і останнім часом зростає в багатьох напрямках. Основною перешкодою для автоматизації в будівельній галузі є конструктивна складова, оскільки реалізується менша кількість вихідної продукції порівняно з іншими сферами промислової промисловості, а також велику роль відіграє зростання вартості обладнання для виготовлення готової продукції, крім цього дана технологія вводить велику кількість обмежень у матеріалах застосовуваних для автоматизації виробництва. На сьогоднішній день будівельна галузь упирається в цілу низку проблем: досить низька трудова продуктивність, дуже велика статистика нещасних випадків на будівельних майданчиках, брак кваліфікованої робочої сили. Очевидно, що будівельна галузь займає лідируючі позиції серед споживачів невідновлюваних ресурсів та природних матеріалів у всьому світі.

Адитивні технології розширили горизонти для багатьох напрямків виробництва, що динамічно розвиваються. 3D-друк дозволив нещодавно розробленим у лабораторних умовах технологіям вийти на новий рівень. Адитивні технології (від англійської Additive manufacturing) – узагальнена назва технологій, що передбачають виготовлення виробу за даними цифрової моделі (або CAD-моделі) методом додавання матеріалу. Технології пошарового синтезу можуть стати проривом для конструкцій, які виготовляються з матеріалів на основі цементу.

Терміну адитивні технології вже понад 2 десятки років. Ще 1986 р. було запатентовано апарат до створення тривимірних об'єктів з допомогою стереолітографії [12]. На сьогоднішній день адитивні технології застосовуються в багатьох галузях виробництва від машинобудування до кулінарії [13]. Оцінки рівня розвитку пошарового синтезу протягом останнього десятиліття дано у працях багатьох дослідників [15-17].

Істотною перешкодою для широкого впровадження в нашій країні адитивних технологій є відсутність бази національних стандартів для адитивного виробництва, зокрема щодо загальної та спеціальної кваліфікації

матеріалів, конструкцій, технологій, обладнання, контролю якості, контролю властивостей та порядку застосування виробів адитивного виробництва. Основною тезою є концентрація та координація зусиль у напрямку створення комплексного підходу розвитку адитивних технологій, включаючи відповідні системи національних стандартів (класифікацію матеріалів, вимоги до якості вихідної сировини, конструкції, технології, обладнання, уніфікацію форматів комп'ютерних моделей).

Для застосування адитивних технологій у будівництві потрібні розробки та вивчення нових матеріалів, що використовуються у 3D-друку. Однак багато розробників стикаються з проблемою підбору матеріалів. Фундаментальні співвідношення концепції індустрії 4.0 (конструкція – матеріал – технологія) ще не інтегровані в будівельну сферу. У цьому звіті розглянуто світовий досвід дослідження та застосування будівельних матеріалів на основі бетонних сумішей, що використовуються для будівельних адитивних технологій, а також властивості цих сумішей та окремих компонентів.

1.2 Будівельні адитивні технології

В даний час спостерігається відмова від загальноприйнятих концепцій у галузі будівництва, і сучасні напрямки орієнтовані саме на адитивні технології зведення [18]. Наукові дослідження, спрямовані на вирішення проблем будівельного 3D-друку, ведуться в багатьох інститутах по всьому світу. Є низка патентів на будівельні суміші для принтерів [19-22]. Крім матеріалів, патентуються також принтери і технології друку [23-25].

На сьогоднішній день адитивні технології, що пройшли шлях від 3D-друку макетів і швидкого прототипування до виготовлення готових виробів для різних галузей промисловості, залучають все більше і більше інвестицій. Зростання інтересу до адитивних технологій обумовлюється безліччю факторів: високий рівень автоматизації виробництва, покращення якості продукції, прискорення процесів створення, можливість оптимізації CAD

моделей, зменшення відходів виробництва [26-30]. Дані чинники є основою успішного початку концепції «цифрових фабрик» майбутнього [31, 32]. Ця революція передбачає цифрову технологію проектування, виготовлення, випробування, а також адитивне виробництво деталей та виробів загалом.

За методами формування шару розрізняють два типи адитивних технологій: Bed Deposition та Direct Deposition.

Bed Deposition – клас технологій, при якому на робочий простір наноситься шар порошкового матеріалу. Формування виробу відбувається пошарово за допомогою джерела тепла: лазера (SLM), електронного променя (EBM) або світла (DLP, SLA) або допоміжної речовини (Binder Jetting) відповідно до поточного перерізу CAD моделі. Залишки порошку видаляються, робоча платформа зміщується і повторюється процес [33].

Direct Deposition - спосіб формування, у якому матеріал подається у місце побудови відповідно до CAD моделлю [33].

Як зазначено у [34], виготовлення опалубки становить від 35 до 60 % від загальної вартості бетонних конструкцій. Можливість будівництва бетонних конструкцій без опалубки є важливою перевагою з погляду зниження витрат, швидкості виробництва та архітектурної свободи, а також полегшення встановлення інженерних комунікацій [35,36]. Адитивні технології ставляться до класу, про зелених технологій, оскільки припускають майже безвідходне виробництво. Висока автоматизація і роботизація процесу дозволяє реалізовувати проекти в агресивних середовищах [37], не наражаючи на небезпеку здоров'я персоналу.

Contour Crafting (CC) – одна з адитивних будівельних технологій, здатна застосовуватися у будівництві великомасштабних об'єктів (Рисунок 1.1) [40].

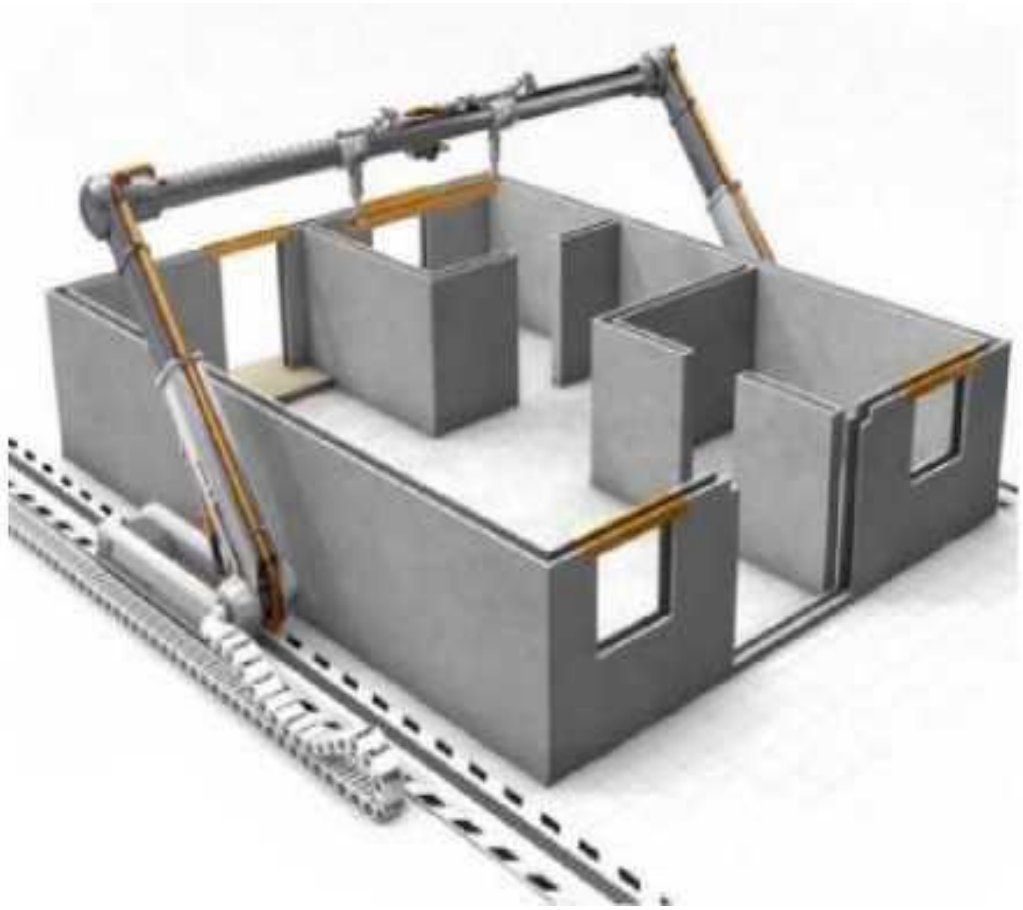


Рисунок 1.1-Установка Contour crafting, США

Інша технологія, яка одержала назву Concrete Printing (CP). Ця технологія була вперше представлена в 2009 році в університеті Лафборо Річардом Басуеллом та його колегами для демонстрації її потенційних можливостей [44]. Цей спосіб аналогічний технології CC, тобто заснований на пошаровому екструдуванні будівельної суміші. Основною відмінністю від CC і те, що у методі CP на екструдері відсутні шпателі (Рисунок 1.2), що дозволяє виконувати ще геометрично складні контури. [46] Саме завдяки цій особливості даний метод виглядає найперспективнішим у будівництві, оскільки створення будівель та споруд унікальних форм стає дедалі пріоритетнішим і затребуваним напрямом у цій сфері [47]. Недоліком є той факт, що через відсутність шпателів на екструдері виникає необхідність обробки поверхні надрукованої споруди [48].



Рисунок 1.2 - Процес побудови технології Concrete Printing

Процес друку з використанням даної технології умовно поділяється на 3 етапи:

- Створення 3D-моделі об'єкта,
- Побудова об'єкта,
- Фінальна обробка об'єкта.

На відміну від методів, описаних вище, екструдер подає не готову будівельну суміш, а клеючу речовину на пісок або інший матеріал, що є порошком. На етапі друку об'єкта шар порошку товщиною 5-10 мм рівномірно наноситься область друку. Потім, на цю поверхню подається клеюча речовина [43]. Після цього наноситься ще один шар порошку необхідної товщини і процес повторюється до завершення друку. Наприкінці шар порошку, який був опорним, видаляється, а поверхня об'єкта шліфується та полірується.

Таким чином, процес практично ідентичний технології Binder Jetting [49]. Відмінним прикладом можливостей технології DShape є скульптура "Радіолярія", надрукована ще в 2009 році (Рисунок 1.3) [50]. Матеріалом для скульптури послужив штучний пісковик, а як клеюча речовина виступав розчин з додаванням оксиду магнію [51]. Отриманий матеріал виявився досить міцним, щоб витримати вагу всієї конструкції та був абсолютно нешкідливий для довкілля [52].



Рисунок 1.3-Скульптура “Радіолярія”, виготовлена за технологією D-Shape

Завдяки тому, що всі матеріали є натуральними та піддаються лише незначній обробці, кінцевий продукт друку має дуже природний вигляд [53]. На даний момент розглядається можливість використання цієї технології для

друку з місячного каменю – реголіту. Очікується, що за позитивних результатів досліджень у цій галузі технологію D-Shape можна буде використовувати для друку споруд у космосі [54].

Основним недоліком для застосування даної технології саме у будівництві є те, що вона дозволяє друкувати лише об'єкти невеликих розмірів. Це обмеження пов'язане з властивостями піску та йому подібних матеріалів, які використовуються для друку. Таким чином, можна зробити висновок, що дана технологія краще підходить для друку різних декоративних елементів, ніж для зведення будівель та споруд.

Варто зазначити, що однією з серйозних проблем, що перешкоджають поширенню технологій, заснованих на способі Direct Deposition (CC і CP), є недолік матеріалів, що відповідають заданим вимогам.

1.3 Основні компанії на ринку будівельного 3D друку

На сьогоднішній день існує безліч проектів, спрямованих на розвиток адитивних будівельних технологій. Раніше згадана китайська компанія Winsan приділяє велику увагу вдосконаленню технологій друку та модернізації будівельних 3D принтерів, оскільки прагне зміцнити своє лідерство на світовій арені. Як демонстрація своїх можливостей, у 2014 р. компанія Winsun надрукувала 10 одноповерхових будинків за 24 години. Через рік на виставці в промисловому парку Сучжоу, в провінції Цзяну, китайські інженери представили відразу 2 проекти: п'ятиповерховий житловий будинок, який по праву вважається найвищим будинком, побудованим за технологією 3D-друку і двоповерхова вілла, площею 1100 м^2 (Рисунок 1.4). Навесні 2016 року Winsun представила «офіс майбутнього», виготовлений за адитивною технологією у місті Дубай, Об'єднаних Арабських Еміратів (Рисунок 1.5).



Рисунок 1.4-Об'єкти представлені компанією Winsun на виставці у Сучжоу



Рисунок 1.5-«Офіс майбутнього» в ОАЕ

Total Kustom - це організація, що базується у Міннесоті, США, заснована інженером Руденком. Він самостійно розробив конструкцію принтера, аналогічного технології Concrete Printing. Його винахід призначений для зведення малоповерхових будов площею до 200 м^2. Швидкість друку варіюється в залежності від умов виконання робіт, навичок оператора, складності 3D-моделі, і в середньому становить 48 годин для конструкції висотою 3 м, площею 100 м^2. Перш ніж розпочати реалізацію комерційних проектів, Руденко протягом кількох років працював над демонстраційною моделлю - бетонним замком (Рисунок 1.6). За цей час модернізував конструкцію принтера, відпрацьовував технологію друку, підбирав оптимальний склад бетонної суміші. Після цього команда Total Kustom здійснила проект зі зведення номера в Lewis Grand Hotel у Філіппінах (Рисунок 1.7). Він вважається першим комерційним будівельним об'єктом, створеним за допомогою 3D-друку.



Рисунок 1.6- Демонстраційна модель «Замок»



Рисунок 1.7-Процес будівництва номера у Lewis Grand Hotel

Мобільний будівельний 3D-принтер APIS COR (Рисунок 1.8). Його винахід принципово відрізняється від конкурентів. APIS COR здатний виконувати друк споруди «зсередини» завдяки своїй унікальній конструкції. 3D-принтер APIS COR може зводити шар за шаром стіни з бетонної суміші. Дисперсне армування якісно покращує механічні характеристики бетонів, а також дозволяє скоротити робочий переріз конструкції та у ряді випадків відмовитися від використання стрижневої арматури або зменшити її витрату. Інженери APIS COR вивчають можливість застосування для будівництва геополімерних матеріалів, які є екологічнішими.



Рисунок 1.8-Принтер APIS COR

Продукція на кшталт належить до портальним принтерам, тобто. для його функціонування необхідна система напрямних, що забезпечують пересування (Рисунок 1.9). На даний момент виготовляються принтери кількох модифікацій. Компанія веде розробки щодо розширення застосовуваних складів, збільшення робочого поля. Компаніями-партнерами було розроблено понад 15 складів для друку.

Варіанти вихідного матеріалу:

- каолінова суміш,
- склофібробетон,
- цементна суміш М300 з мінеральними добавками,
- дрібнодисперсна цементна суміш,
- високоміцна цементна суміш.



Рисунок 1.9-Будівельний 3D-принтер S-4063

Компанія Monolite UK розробила та запатентувала установку, що працює за технологією Binder Jetting для будівництва будівель. Вона складається з жорсткої рами, великої плоскої платформи і друкувальної голівки, що налаштовується, вміщує до 300 сопел. CAD-CAM програмне забезпечення керує механізмом у процесі будівництва, виконуючи сканування по всій поверхні та осадження сполучної речовини.

Створений у 2007 році оригінальний принтер став першим у світі масштабним струменевим принтером, який використовує 3D технології друку (Рисунок 1.10).



Рисунок 1.10- D-Shape принтер

Принтер використовує спеціальний сполучний і звичайний пісок (подрібнений доломітовий вапняк) як єдина сировина. Пісок змішують з твердим каталізатором, потім отриману суміш піддають впливу рідкого сполучної речовини. Надлишок піску може бути повторно використаний для наступного друку.

Компанія використовувала свою технологію для створення штучних рифів, захисного зміцнення для миротворчих військ, одноповерхового

будинку та вуличних меблів, а також для створення унікальних об'єктів ландшафтної архітектури. Нинішній президент компанії Адам Кушнер домігся дозволу на будівництво нерухомості в США, і зараз розробляється проект зі створення апартаментів у Нью-Йорку.

Архітектурна компанія DUS надрукувала невеликий будиночок об'ємом 25 $м^3$ у занедбаній промисловій зоні Амстердама (Рисунок 1.11). Творці продемонстрували можливість швидкого 3D-друку притулків у зонах стихійного лиха або у випадках інших екстрених ситуацій.



Рисунок 1.11 - Urban Cabin

Конструкція виконана з біорозкладного пластику на основі льону - матеріалу, розробленого спільно з концерном Henkel. Будівля має стільникову конструкцію, що дозволяє досягати достатньої міцності за мінімальних матеріальних і тимчасових витрат. Подібні житла не планується робити незмінними. Використаний пластик можна подрібнити і перетворити на матеріал для нових проектів [26]. Для виготовлення будиночка був використаний 3D-принтер власної розробки під назвою «KamerMaker» - пристрій висотою три з половиною метри, що вміщається у звичайний

транспортний контейнер. Така концепція більш обмежена за розмірами готових виробів, ніж системи, що використовують роботизовані маніпулятори, але творці вирішили віддати перевагу стабільності та вищій якості. 3D-друк великих будівель залишається можливим, але частинами. Легка стільникова конструкція дозволяє розміщувати будівництво в потрібному місці за допомогою невеликого крана або навіть вручну. У разі потреби можна залити фундамент і підлогу, але розробники вважають, що при використанні дизайну за призначенням такі заходи будуть зайвими.

World's Advanced Saving Project (WASP) – це проект, створений командою італійських дослідників та інженерів, спрямований на розробку технології 3D-друку. WASP виробляє професійні принтери з метою стимулювання розвитку та впровадження цієї технології, налагодження процесів виробництва для вирішення проблеми енергоефективності, яка є актуальною в сучасному світі. WASP розробили будівельний принтер Big Delta заввишки 12 м (Рисунок 1.12).



Рисунок 1.12- Принтер Big Delta

Одним із завдань WASP є зведення конструкцій із матеріалів, які можна видобути в регіоні будівництва. Для здійснення цієї мети потрібен мобільний механізм із низьким енергоспоживанням. Незважаючи на значні розміри, для його встановлення потрібно близько години, більше того, для живлення принтера можуть використовуватися сонячні панелі. Завдяки соплу, що обертається, матеріал не тільки видавлюється, але і змішується на виході що робить його суцільнішим. Також WASP розробили нову конструкцію екструдера, який здатний втягувати надлишок екструдованого матеріалу. Головним проектом WASP є екологічно чисте селище з низьким споживанням енергії, яке зветься «Шамбала». Основним будівельним матеріалом є суміш на основі ґрунту та соломи з додаванням піску та вапна.

1.4 Висновки літературного критичного огляду

Завдяки зробленому літературному критичному огляду було з'ясовано, що будівельні адитивні технології розвиваються вже давно в усьому світі, також і в Україні. Актуальним питанням на сьогоднішній день є вирішення проблем з відсутністю нормативної та законодавчої бази для будівництва будівель за допомогою 3D принтера, яка обмежує його застосування для масової забудови, тому великі будівельні компанії не набувають будівельних принтерів. На сьогоднішній день ці пристрої застосовуються в основному для малоповерхового та малогабаритного індивідуального будівництва, а також для виготовлення малих архітектурних форм. Також відсутня універсальна суміш для друку через те, що різні виробники застосовують різні бетонні суміші, експериментуючи зі складом компонентів та їх співвідношенням. Виходячи з усього цього можна зробити висновок про те, що будівельний 3D друк потребує вивчення.

РОЗДІЛ 2
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ПРИКЛАДІ ІНДИВІДУАЛЬНОГО 2-Х ПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ

2.1 Архітектурні рішення

2.1.1 Опис та обґрунтування зовнішнього та внутрішнього вигляду об'єкта капітального будівництва

Архітектурно-планувальні рішення розроблені відповідно до нормативних вимог щодо пожежної безпеки та інших чинних норм і правил (Рисунок 2.1).

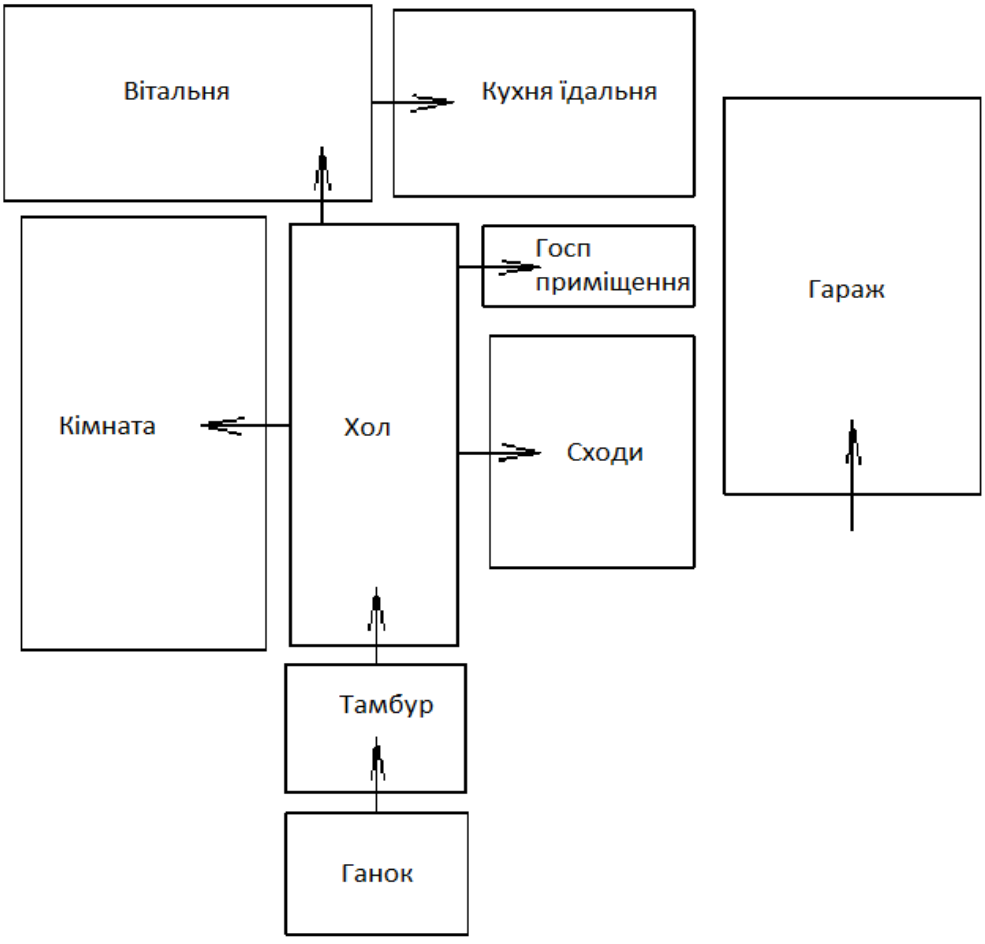


Рисунок 2.1-Блок схема будинку

Проектована двоповерхова будівля з підвалом, прямокутної форми в плані з розмірами в осях "1-9"-"А-Е" 11,65х18.05 м. Будівля являє собою 4-х кімнатний житловий будинок.

Для досягнення мети ВКРМ розглянуто 2 варіанти основних вертикальних несучих конструкцій (Таблиця 2.1).

Таблиця 2.1-Варіанти основних вертикальних несучих конструкцій

<table>
<tr><td>1 варіант (цегляний кістяк будівлі)</td><td>2 варіант (кістяк надрукований на 3D-принтері)</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td></tr>
<tr><td colspan="2">Фундаменти – залізобетонні збірні стрічкові.
Висота приміщень підвалу – 2.7 м.
Вимощення – бетонне (бетон В7,5) по периметру будівлі товщиною 150 мм і шириною 1000 мм, утеплене екструдованим пінополістиролом Стирекс 35, на основі з гравійно-піщаної суміші товщиною 150мм.
Ганки - монолітні бетонні з покриттям із керамогранітної плитки.
Козирки - з покриттям з металевого профільованого листа С21-1000-0,6 за дерев'яними кроквами.
Перекриття - збірні залізобетонні, багатопустотні плити.
Висота приміщень першого та другого поверху – 3 м.</td></tr>
<tr><td>Зовнішні стіни – цегляні тришарові, зовнішня верста 120 мм, внутрішня верста 380 мм та 120 мм утеплювач. Внутрішні стіни – цегляні 380 мм. Перегородки – цегляні товщиною 120 мм. Перемички – залізобетонні.</td><td>Зовнішні стіни – надруковані 3D-принтером товщиною 270 мм. (Див. теплотехнічний розрахунок). Шар бетону 80 мм, шар утеплювача 140 мм та шар бетону 50 мм. Внутрішні стіни – надруковані 3D-принтером товщиною 270 мм. Перегородки – надруковані 3D-принтером, товщиною 100 мм. Перемички – надруковані 3D-принтером</td></tr>
</table>

1	2
Внутрішнє оздоблення - відповідно до відомості оздоблення приміщень; Підлоги – лінолеум, керамічні; Двері - відповідно до відомості заповнення отворів; Вікна - з ПВХ профілю відповідно до відомості заповнення отворів; Покрівля - вальмова з покриттям з бітумно-полімерних листів по дерев'яних кроквяних конструкціях, з не організованим. Утеплення горищного перекриття мінераловатними плитами, t=200мм. Матеріал покрівлі - бітумна черепиця, що кріпиться по суцільній OSB плиті по решетуванні з дощок 30х100мм крок 300мм. Крокви прийняті перетином 100х200 мм з кроком 800 мм. Кріплення крокв до мауерлата перетином 120х120 мм проводиться за допомогою подвійного скручування діаметром 4 мм через одну кроквяну ногу і кріпляться йоржами в шов кладки.	

Техніко-економічні показники будівлі представлені у таблиці 2.2. Проектна документація розроблена на підставі та відповідно до вимог ДБН, ДСТУ та інших нормативних актів/

Таблиця 2.2-Техніко – економічні показники будівлі

Номер	Найменування	Кількість	Од.вим.
1	Загальна площа будівлі	312.91	$м^2$
2	Житлова площа	89.75	$м^2$
3	Загальна площа квартири	72.81	$м^2$
4	Строительный объем	1644.28	$м^3$
5	Площа забудови (з урахуванням ганків)	202.38	$м^2$

2.1.2 Обґрунтування прийнятих об'ємно-планувальних та архітектурно-мистецьких рішень

Будинок, що проектується, розрахований для проживання 6 осіб. Будинок розділений на денну (суспільно-господарську) та нічну (спальну) зони. Усі приміщення вираховані виходячи з норм.

У цьому проекті пропонується двоповерховий індивідуальний житловий будинок із цокольним поверхом. Будинок розмірами у плані 12,20х18,05 м. Входи до житлового будинку розташовані з боку фасадів "1-9", "А-Е".

Цокольний поверх. На цокольному поверсі розташовані такі приміщення: 3 комори, хол, літня кухня, кімната відпочинку, пральня, допоміжне приміщення, вбиральня (Таблиця 2.3).

Таблиця 2.3-Експлікація приміщень цокольного поверху

Номер приміщення	Найменування	Площа, $м^2$
1	2	3
1	Комора	11.58
2	Хол	6.78
3	Літня кухня	12.55
4	Комора	4.77
5	Комора	4.43
6	Кімната відпочинку	30.85
7	Пральня	10.33
8	Допоміжне приміщення	1.51
9	Вбиральня	11.72

Перший поверх. За рівень чистої статі приймаємо позначку підлоги першого поверху. На першому поверсі розташовані наступні приміщення: тамбур, хол, 4 комори, житлова кімната, вітальня, веранда, кухня-їдальня, гараж (Таблиця 2.4).

Таблиця 2.4-Експлікація приміщень першого поверху

Номер приміщення	Найменування	Площа, м^2
1	2	3
1	Тамбур	4.14
2	Хол	25.71
3	Комора	1.41
4	Житлова кімната	13.78
5	Вітальня	30.85
6	Веранда	7.95
7	Кухня-їдальня	15.48
8	Комора	2.32
9	Комора	1.39
10	Комора	1.48
11	Гараж	31.05

Другий поверх. На другий поверх будівлі ведуть сходи. На другому поверсі запроектовано три житлові кімнати, хол, балкон, санвузол, ванну кімнату (Таблиця 2.5).

Таблиця 2.5-Експлікація приміщень другого поверху

Номер приміщення	Найменування	Площа, м^2
1	2	3
1	Хол	24.13
2	Балкон	1.27
3	Житлова кімната	10.62
4	Санвузол	4.24
5	Житлова кімната	19.02
6	Ванна кімната	8.07
7	Житлова кімната	15.48

2.2 Протипожежні заходи

Клас конструктивної пожежної небезпеки проектованого будинку в першому і у другому випадку - С1.

На проектованому об'єкті передбачено по одному евакуаційному виходу з першого поверху. З підвального поверху передбачений евакуаційний і аварійний вихід.

Висота евакуаційних виходів у світ 2,1м і ширина 1,0м.

2.3 Теплотехнічний розрахунок будівельних конструкцій

2.3.1 Розрахунок 3-х шарової конструкції стени

Схема огороджувальної конструкції показано на рисунку 2.2.

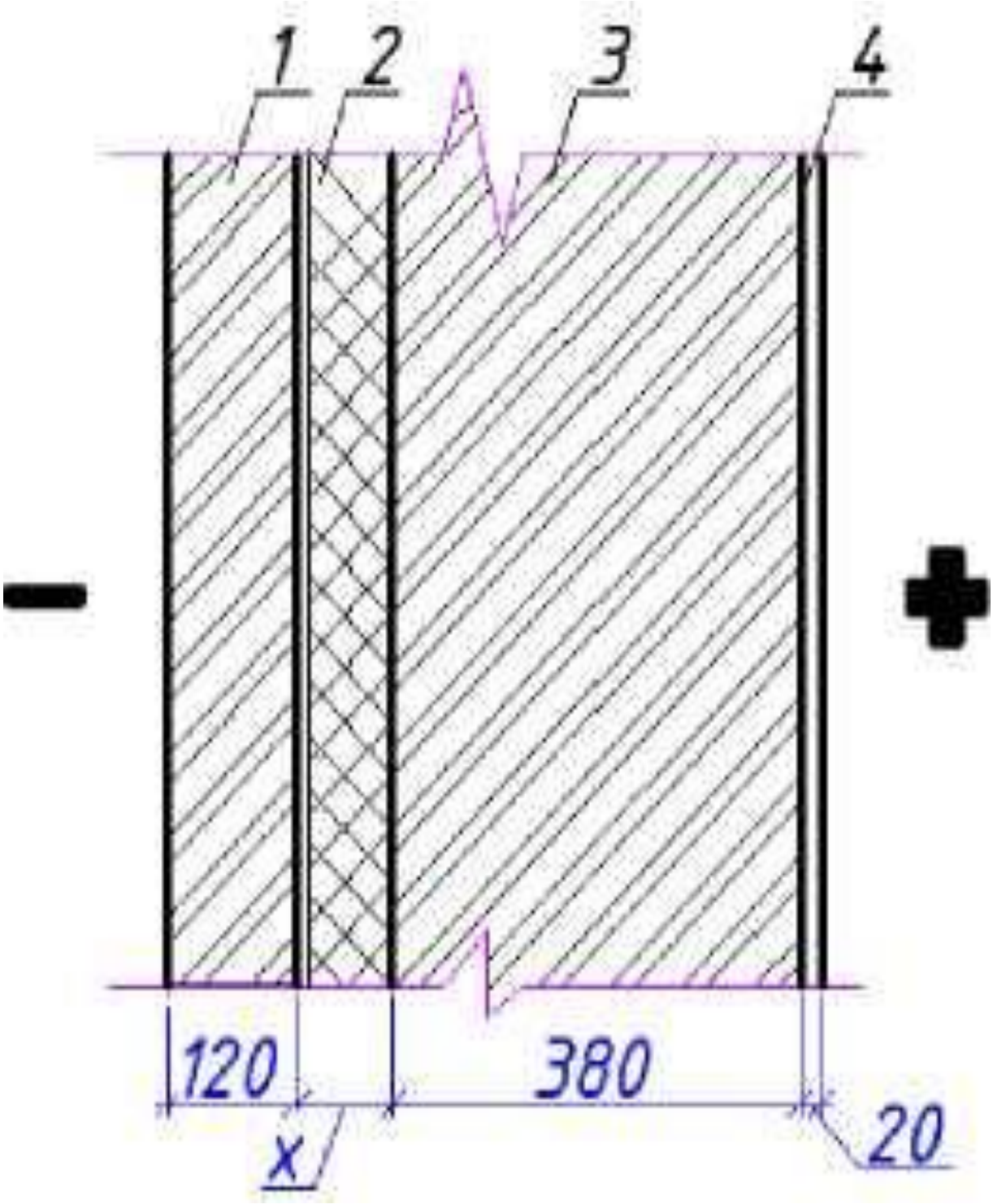


Рисунок 2.2-Схема огороджувальної конструкції

де 1 - кладка з глиняної цегли звичайної на цементно піщаному розчині, 2 - утеплювач мінераловатні плити - KNAUF Therm Wall, 3 - кладка з глиняної цегли звичайної на цементно піщаному розчині, 4 - розчин вапняно-піщаний.

Значення характеристик матеріалів зведено до таблиці 2.6.

Таблиця 2.6-Термічний опір конструкції стіни

Найменування матеріалу	Товщина шару δ, м	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/м^{2o}C	Щільність γ, кг/м^3
Кладка з глиняної цегли звичайної на цементно піщаному розчині	0.12	0.81	1450
Утеплювач мінераловатні плити - KNAUF Therm Wall	x	0.034	30
Кладка з глиняної цегли звичайної на цементно піщаному розчині	0.38	0.81	1450
Розчин вапняно піщаний	0.02	0.81	1800

Визначимо термічний опір стіни за формулою 2.1.

$$R_0 = R_{int} + R_{ext} + \sum m,i = (\frac{1}{8.7} + \frac{1}{23} + 0.41 + 0.67 + \frac{0.12}{0.034}) = 3{,}95 \text{м}^2\,\text{С/Вт} \quad (2.1)$$

Перевірка за формулою 2.2.

$$R_0 = 3{,}95\ \text{м}^{2o}\text{С/Вт} > R_{Тр0} = 3{,}74\ \text{м}^{2o}\text{С/Вт} \quad (2.2)$$

Умову виконується, конструкцію можна застосовувати по наведеному опору теплопередачі термотовщину t = 120 мм.

2.3.2 Розрахунок горищного перекриття

Схему огороджувальної конструкції показано на рисунку 2.3:

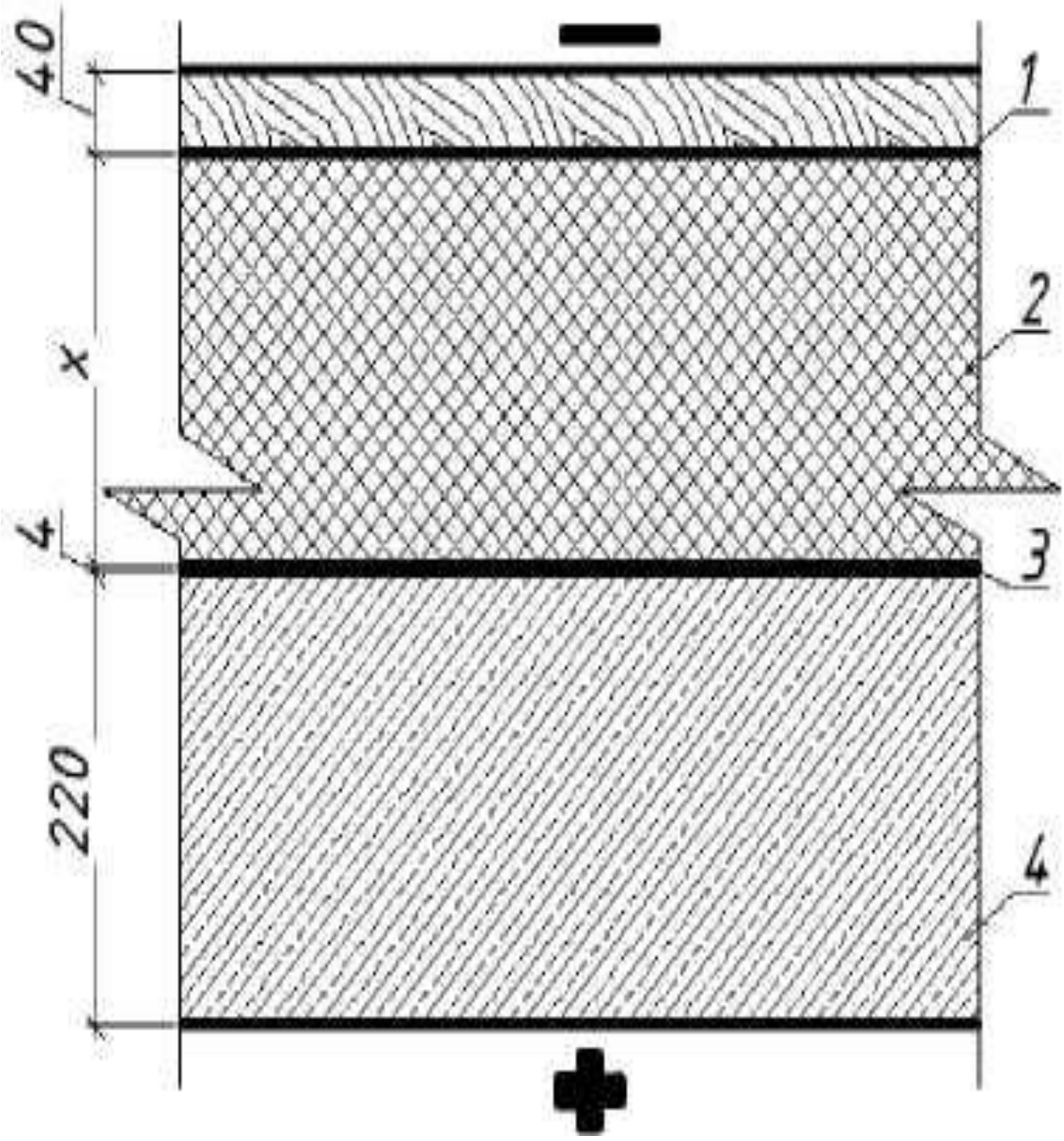


Рисунок 2.3-Схема огороджувальної конструкції

де 1 - сосна і ялина вздовж волокон, 2 - утеплювач мінераловатні плити - KNAUF Therm Roof, 3 - пароізоляція-плівка Ютафолд Д, 4 - залізобетон.

Значення характеристик матеріалів зведено до таблиці 2.7.

Таблиця 2.7-Термічний опір конструкції перекриття

Найменування матеріалу	Товщина шару δ, м	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/м^{2o}С	Щільність γ, кг/м^3
Сосна та ялина вздовж волокон	0.04	0.35	520
Утеплювач мінераловатні плити - KNAUF Therm Roof	x	0.034	30
Пароізоляція-плівка Ютафолд Д	0.002	0.17	100
Залізобетон	0.22	2.04	2500

Визначимо термічний опір перекриття за формулою 2.3.

$$R_0 = R_{int} + R_{ext} + \sum m,i = (\frac{1}{8.7} + \frac{1}{23} + 0.41 + 0.67 + \frac{0.12}{0.034}) = 4.98 м^{2o}С/Вт \quad (2.3)$$

Перевірка за формулою 2.4.

$$R_o = 4.98 м^{2o}С/Вт > R_{Тр0} = 3,74 м^{2o}С/Вт \quad (2.4)$$

Умову виконується, конструкцію можна застосовувати щодо проведеного опору теплопередачі термотовщину t = 200 мм.

2.4 Вплив адитивних технологій на об'ємно-планувальні рішення будівлі

Застосування технологій 3D-друку дозволяє будувати будівлі практично будь-якої форми, що дає дизайнерам та архітекторам створювати

унікальні проекти. Також відбувається автоматизація ручної праці, що дозволяє зменшити кількість будівельних робітників і мінімізувати ризик виробничих травм. За командою оператора 3D-принтер створюватиме фундамент майбутньої будівлі, формуватиме її стіни, а бригаді будівельників залишиться лише контролювати процес 3D-друку та укладати плити перекриття на різних етапах будівництва будівлі.

Ще одна перевага при використанні технології тривимірного друку – швидкість. Ця технологія оптимально підходить для будівництва будинків після надзвичайних подій або для створення соціального житла. Яскравим прикладом є проект у Шанхаї - зведена за добу група з десяти 3D-друкованих будинків, кожен площею 200 квадратних метрів. Завдяки технології 3D-друку вартість одного такого будинку склала 4800 доларів. Друк здійснювався за контуром усієї будівлі. Цілком величезним 3D-принтером довжиною 150 метрів, шириною 10 м і висотою 6,6 м. Натомість новим будівельним матеріалам компанією використовувалися будівельні та промислові відходи та за допомогою комп'ютерного моделювання в конструкціях будинків, були закладені роз'єми під трубопровід, електропроводку та віконні блоки.

2.5 Теплотехнічний розрахунок багатошарової конструкції стіни, надрукованої будівельним 3D принтером

Таблиця 2.8-Спосіб утеплення зовнішньої стіни, надрукованої за допомогою 3D-принтера

Спосіб утеплення	Товщина шару δ, м	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/м^{2o}С	Щільність γ, кг/м^3
Пінобетон	0.14	0.069	200
Вермікуліт	0.1	0.05	200
Перліт	0.09	0.043	100

З даної таблиці можна дійти невтішного висновку у тому, що у ролі утеплювача найкраще підходить пінобетон, оскільки всі інші утеплювачі мають дуже малу щільність.

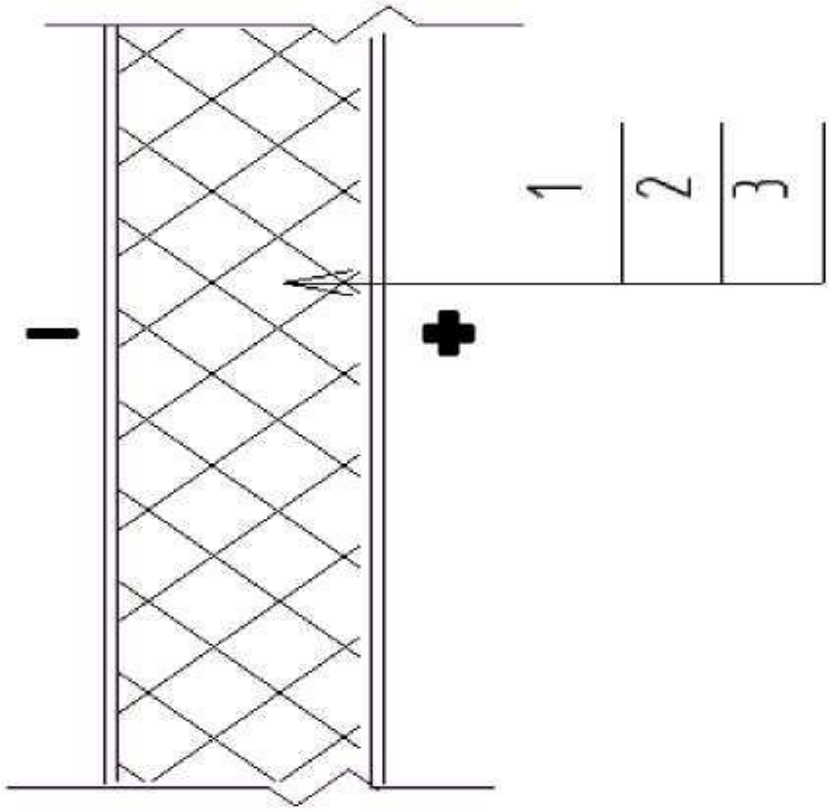


Рисунок 2.4 - Шар зовнішньої стіни

1-бетон, 2-пінобетон, 3-бетон.

Значення характеристик матеріалів зведено до таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Термічний опір конструкції стіни

Найменування матеріалу	Товщина шару δ, м	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/м^2°С	Щільність γ, кг/м^3
Бетон	0.05	0.12	2300
Пінобетон	X	0.069	200
Бетон	0.08	0.12	2300

55%-розрахункова відносна вологість внутрішнього повітря.

де t_{int} = (20°C) -температура внутрішнього повітря.

z_{ht} = 236 діб. тривалість опалювального періоду із середньою добовою температурою зовнішнього повітря 8°C.

t_{ext}=(-38°C) -розрахункова температура зовнішня повітря найбільш холодної, п'ятиденки.

t_{ht}=(-7,7°C) -середня температура зовнішнього повітря за оптимальний період.

А - нормальний вологий режим приміщення та умови експлуатації огороджувальних конструкцій.

Визначення градуса-доби опалювального періоду за формулою 2.5.

$$D_d = (t_{int} - t_{ht})z_{ht} = (20 + 7,7)\ 236 = 6537,2°C \text{ доба} \quad (2.5)$$

Нормативне значення наведеного опору теплопередачі за формулою 2.6.

$$R_{reg} = \alpha D_d + b \quad (2.6)$$

де α та b - коефіцієнти, α = 0.0003, b = 1.2.

$$R^w_{reg} = \alpha D_d + b = 0,0003 * 6537 + 1,2 = 3.16 \text{ м}^2°\text{C/Вт} \quad (2.6)$$

Визначимо норми теплового захисту за умовою санітарії за формулою 2.7.

$$R_{reg} = \frac{t_{int} - t_{ext}}{\Delta t_n \alpha_{int}} = \frac{1(20+38)}{4.5*8.7} = \frac{58}{39.15} = 1.48 \text{ м}^2°\text{C/Вт} \quad (2.7)$$

де n-коефіцієнт прийнятий за таблицею.

Δt_n = 4,5 нормований температурний перепад внутрішнього повітря та температурою внутрішньої поверхні огороджувальної конструкції

α_{int} = 8,7°C/Вт - коефіцієнт теплопередачі внутрішньої поверхні

огороджувальної поверхні. З наведених вище за необхідний опір R_{red} за умови енергозбереження.

Позначаємо $R_{ОТР}$ = 3,16°С/Вт. Для кожного шару стіни згідно з рисунком 2.3 розрахуємо термічний опір стіни за формулою 2.8.

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (2.8)$$

де δ_i - товщина і-го шару, м;

λ_i - розрахунковий коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару, Вт/м^2°С;

$$R_1 = 0.05/0.12 = 0.41 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт} \quad (2.8)$$

$$R_1 = 0.08/0.12 = 0.67 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт} \quad (2.8)$$

Визначаємо мінімально допустимий термічний опір теплоізоляційного матеріалу за формулою 2.9.

$$R_{ут}^{тр} = R_{тр0} - (R_{int} - R_{ext} + \sum R_i) = 3.16 - (\frac{1}{8.7} + \frac{1}{23} + 0.41 + 0.67) =$$

$$= 1.94 \text{ м}^2\text{°С/Вт} \quad (2.9)$$

де R_{int} = 1/ α_{ext} = 23 опір тепловіддачі зовнішньої поверхні огороджувальних конструкцій.

$\sum R_i$ - сума термічних шарів огороджувальної конструкції.

Знайдемо потрібну товщину утеплювача за формулою 2.10.

$$\delta_{ут}^{тр} = \lambda_i * R_{ут}^{тр} = 0.069 \bullet 1.94 = 0.14 \text{ м} = 140 \text{ мм} \quad (2.10)$$

де λ_i- теплопровідність шару, що шукається, таблиця 2.3.

Визначимо термічний опір стіни за формулою 2.11.

$$R_0 = R_{int} + R_{ext} + \sum m,i = (\frac{1}{8.7} + \frac{1}{23} + 0.41 + 0.67 + \frac{0.11}{0.04}) = 3,25 м^2 °C/Вт \quad (2.11)$$

Перевірка за формулою 2.12.

$$R_0 = 3,23 м^2°C/Вт > R_{Тр0} = 3,16 м^2°C/Вт \quad (2.12)$$

Умову виконується, конструкцію можна застосовувати по проведеному опору теплопередачі термотовщину t = 140 мм.

2.6 Опис та обґрунтування конструктивних рішень будівлі

Для досягнення мети вкрм у роботі розглянуто 2 варіанти основних вертикальних несучих конструкцій.

1.Варіант будинок з цегляним вертикальним несучим каркасом.

Конструктивна система будівлі - стінова, з подовжніми та поперечними несучими стінами, з опиранням багатопустотних плит перекриття по обидва боки в поздовжньому напрямку для передання конструкції жорсткості.

Для зведення стін з кам'яної кладки застосовуємо керамічні цеглини.

Несучі кам'яні стіни зводимо з кладки на розчинах із спеціальними добавками, що підвищують зчеплення розчину з цеглою або каменем. Вертикальні кладкові шви заповнюємо розчином. Для кладки несучих і самонесучих стін застосовуємо повнотілу і порожнисту цеглу м рки М100. Для зведення перегородок і стін, що не несуть, застосовуємо цеглу марки М100.

Висота поверху будівлі з несучими стінами з цегляної або кам'яної кладки, не посиленої армуванням або залізобетонними включеннями, не повинна перевищувати 5 м за розрахункової сейсмічності 7 балів. У будинках

з дрібних пористо-бетонних бл ків відстань між стінами незалежно від розрахункової сейсмічності не повинна перевищувати максимально допустимих і дорівнює 4.9 м.

У рівні перекриттів та покриттів влаштовуємо антисейсмічні пояси по всіх поздовжніх та поперечних стінах, що виконуються з монолітного залізобетону та безперервним армуванням.

Антисейсмічні пояси верхнього поверху пов'язані з кладкою вертикальними випусками арматури.

Антисейсмічний пояс (з опорною ділянкою перекриття) влаштовуємо всю ширину стіни; у зовнішніх стінах завтовшки 620 мм.

Висота пояса складає 150 мм, клас бетону – С10/15.

Поздовжня арматура поясів 4 d10.

Сейсмостійкість кам'яних стін будівлі підвищуємо сітками з арматури.

Кладку армуємо сітками в горизонтальних швах та окремими вертикальними стрижнями або каркасами, що розміщуються в тілі кладки або штукатурних шарах.

2. Варіант будинок з надрукованим на 3D-ринтері вертикальним каркасом, що носить

Конструктивна система будівлі - стінова, з поздовжніми та поперечними несучими стінами, з опиранням багатопустотних плит перекриття по двох сторонах у поздовжньому напрямку для передання конструкції жорсткості.

Максимальна відстань між несучими стінами дорівнює 4.9 м-коду.

Перекриття збірно-монолітні.

Армування монолітних стін виконуємо просторовими каркасами, що збираються із плоских вертикальних каркасів.

У просторових каркасах, застосовуємо для армування поля стін діаметр вертикальної арматури 10 мм, а горизонтальної - 8 мм.

Крок горизональних стрижнів, що об'єднують каркаси 400 мм. Стикування стрижнів та арматурних каркасів при бетонуванні конструкцій монолітних будівель здійснюємо внахлестку без зварювання - при діаметрі

стрижнів до 20 мм.

Перемички армуємо просторовими каркасами і заводимо їх арматуру за межу отвору на вимоги з урахуванням додаткових вимог цього зведення правил, але не менш ніж на 500 мм.

Крок поперечних стрижнів просторових каркасів перемичок 10 d (d – діаметр поздовжніх стрижнів). Діаметр поперечних стрижнів 8 мм.

2.7 Розрахунок несучого цегляного простінка

2.7.1 Вибір матеріалів, їх розрахункові характеристики

Матеріал простінка: цегла керамічна звичайна марки М100; марка розчину М50 Щільність кладки ρ = 1800 кг/м^3, суцільна кладка.

Розрахунковий опір стиску кладки зі звичайної цегли марки М100 на розчині марки М50: R = 1,3 МПа.

Тимчасовий опір стиску матеріалу кладки: R_u = kR = 2*1,3 = 2,6 МПа. Пружна характеристика кладки із звичайної цегли пластичного пресування α = 1000.

2.7.2 Розрахункова схема, збирання навантажень, визначення зусиль

Приймаємо кількість отворів на один проліт рівним одному, тоді ширина простінка складе (Рисунок 2.5):

$$b = L - b_{от} = 5.04 - 2.65 = 2.39м \qquad (2.13)$$

де L – крок зовнішніх стін будівлі, м; $b_{от}$ - ширина дверного отвору, м.

Площа перерізу простінка за формулою 2.14.

$$A = 2390'380 = 908\ 200\ мм^2 \quad (2.14)$$

Коефіцієнт умов роботи кладки $\gamma_c = 1,0$, т.як А = 0.908 м^2 > 0,3 м^2.

Розрахункова довжина простінка за формулою 2.15.

$$l_0 = H = 3000\ мм \quad (2.15)$$

Гнучкість простінка за формулою 2.16.

$$\lambda = l_0 / h = 3000/380 = 7.9. \quad (2.16)$$

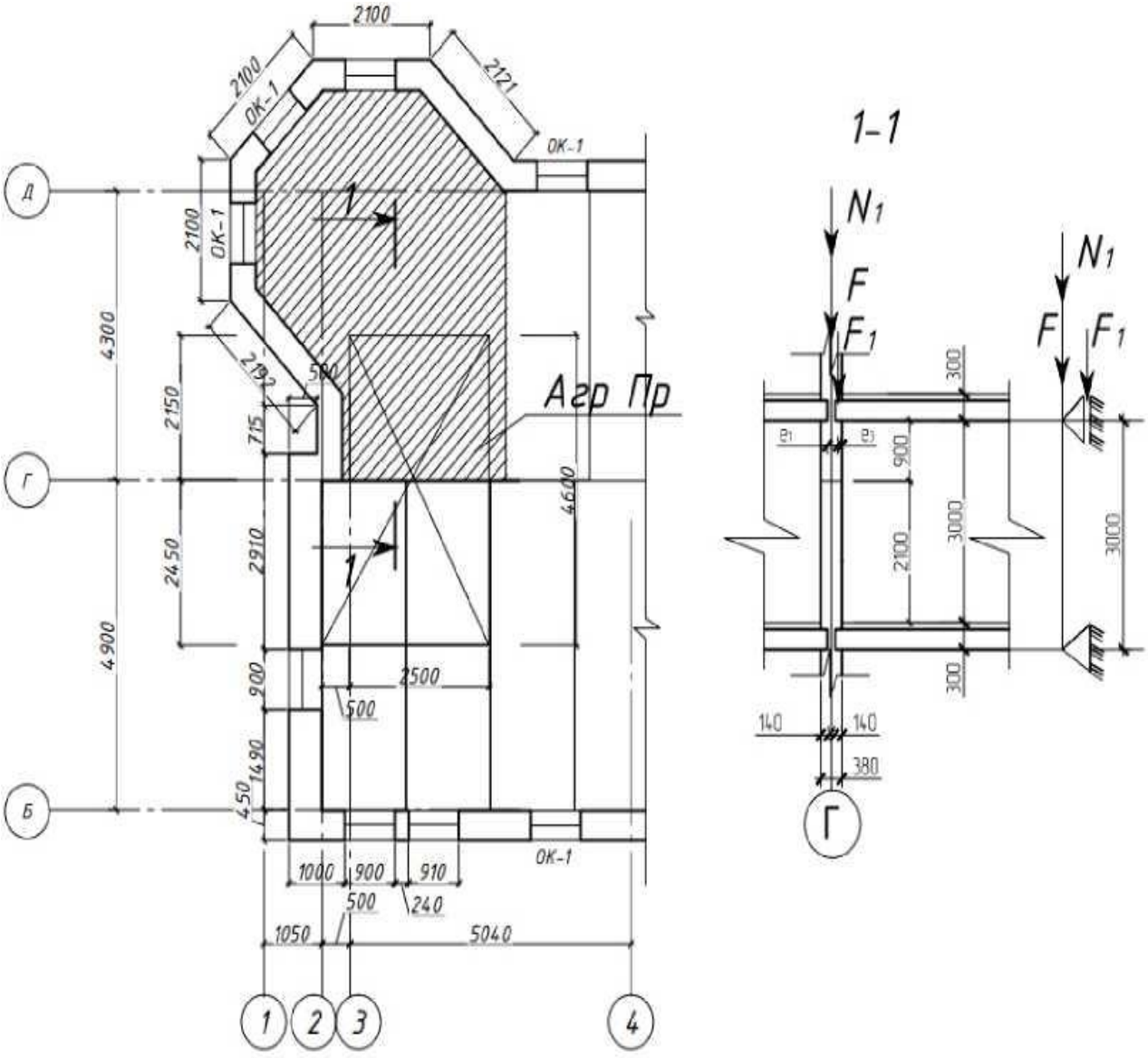


Рисунок 2.5 - Розрахункова схема цегляного простінка

Простінок розраховується на такі розрахункові поєднання навантажень: постійне навантаження + тимчасове навантаження, ваги конструкції покриття + снігове навантаження (Таблиця 2.10).

Таблиця 2.10-Збір навантажень

№ п/п	Найменування навантаження	Од. вим.	Норм. навантаження	γ_{fn}	Розрахункове навантаження
1	2	3	4	5	6
1	Постійні навантаження				
	Вага елементів покрівлі:				
1.1	Покрівельне покриття-бітумно-полімерні листи δ=0.0032 м, ρ=6 кН/м^2	кН/м^2	0.019	1.3	0.025
	Підстилаючий шар δ=0.0032 м, ρ=6 кН/м^2	кН/м^2	0.019	1.3	0.025
	Суцільний настил із вологостійкої фанери δ=0.01 м, ρ=6.37 кН/м^3	кН/м^3	0.06	1.3	0.078
	Обрешітка δ=0.03 м, ρ=5.5 кН/м^3	кН/м^3	0.165	1.3	0.215
	Контрлага вздовж крокв δ=0.05 м, ρ =5.39 кН/м^3	кН/м^3	0.27	1.3	0.35
	Кроквяна нога δ=0.18 м, ρ =5.28 кН/м^3	кН/м^3	0.95	1.3	1.2
Разом елементів покрівлі			1.48		1.89

1	2	3	4	5	6
1.2	Власна вага горищного перекриття				
	Дошки δ=0.04 м, р=5.19 кН/м^3	кН/м^3	0.21	1.1	0.231
	Утеплювач δ=0.2 м, ρ=8 кН/м^2	кН/м^2	1.6	1.1	1.76
	Пароізоляція δ=0.0002 м, ρ=4 кН/м^2	кН/м^2	0.0016	1.1	0.0018
	Плита перекриття з/б δ=0.22 м, ρ=25 кН/м^3	кН/м^3	5.5	1.1	6.05
Разом від горищного перекриття			7.3		8.04
1.3	Власна вага міжповерхового перекриття над підвалом та першим поверхом				
	Ламінат δ=0.008 м, ρ=9.7 кН/м^3	кН/м^3	0.08	1.1	0.0088
	Корковий шар δ=0.002 м, р=4.5 кН/м^3	кН/м^2	0.009	1.1	0,0099
	Плівка поліетиленова δ=0.0002 м, ρ=0.9 кН/м^2	кН/м^2	0.00018	1.1	0.0002
	Цементно-піщана стяжка δ=0.04 м, ρ=25 кН/м^3	кН/м^3	1.0	1.1	1.1
	Пінополістирол δ=0.03 м, ρ=6 кН/м^3	кН/м^3	0.18	1.1	0.2
	Плита перекриття з/б δ=0.22 м, ρ=25 кН/м^3	кН/м^3	5.5	1.1	6.05
Разом від міжповерхового перекриття			6.8		7.4
1.4	Вага елементів підлоги				
	Плита гранітогрес δ=0.008 м, ρ=16.5 кН/м^3	кН/м^2	0.132	1.1	0.15
	Клей δ=0.004 м, ρ=12.7 кН/м^3	кН/м^3	0.05	1.1	0.06
	Монолітна з/б плита δ=0.1 м, ρ=25 кН/м^3	кН/м^3	2.5	1.1	2.75

1	2	3	4	5	6
1.4	Вага елементів підлоги				
	Монолітна з/б плита δ=0.1 м, ρ=25 кН/м^3	кН/м^3	2.5	1.1	2.75
	Підстилаючий шар із бетону δ=0.1 м, ρ=25 кН/м^3	кН/м^3	2.5	1.1	2.75
	Крупнозернистий пісокк δ=0.2 м, ρ=15 кН/м^3	кН/м^3	3.0	1.1	3.3
Разом від елементів підлоги			8.4		9.21
1.5	Власна вага цегляної кладки ρ=18 кН/м^3 Н = 3.3 * 2 + 0.3 = 6.9 м 6=0.62 м. *V = 6.9 * 0.62 *1 = 4.3 м^3*	кН/п.м	77.4	1.1	85.14
2	Тривалі навантаження				
2.1	Корисне навантаження на перекриття	кН/м^2	1.5	1.2	1.8
2.2	Власна вага перегородок ρ=18 кН/м^3 Н = 3.0 * 2 + 0.3 = 6.3 м 6=0.12 м. *V* = 6.3 * 0.12 * 1 = 4.3 м^3	кН/м^3	14.4	1.1	15.8
3	Короткочасні навантаження				
3.1	Снігове навантаження $S^n = S_{0*\mu}$ = 1,2*1 = 1,2 кН/м^2	кН/м^2	1,2	1.4	1.7
	У.т.ч. довготривала (30% від снігової)	кН/м^2	0,36		
Усього з короткочасними			125.0		137.4
Усього без короткочасних			123.8		135.7

Таблиця 2.11 - Збір навантажень на 1 м^2 стіни

Вид навантаження	Нормативне навантаження, кН/м^2	оефіцієнт надійності за навантаженням	Розрахункове навантаження, кН/м^2	Вантажна площа, м^2	Навантаження на простінок, кН
Власна вага стіни з урахуванням штукатурки (0,38х18+0,022х22)	9,7	1,1	10,67	16,7	178,2
Вага ділянки стіни над дверним прорізом заввишки 90 см (dF)	9,7	1,1	10,67	6,7	71,5

Вантажна площа:

стіни $A_{вн1} = (b_{пр} + b_п) * H_{пов} - b_п h_п = (5,04 + 2,39)* 3 - 2,65 * 2,1 = 16,7\ м^2$ (2.17)

карнизної частини $A_{вн2} = (b_{пр} + b_п) * H_{кар} = (5,04 + 2,39)* 0,9 = 6,7 м^2$ (2.18)

Визначення розрахункових зусиль.

Власна вага стіни всіх поверхів, що лежать вище, за формулою 2.19:

$$N_1 = 71,5 + 178,2 * 1 = 249,7 кН \quad (2.19)$$

Навантаження від покриття та перекриттів вищих поверхів за формулою 2.20:

$$F = q_{кр}^{роз} * А_{вн} + q_{пок}^{роз} * А_{вн} + q_{пер}^{роз} * А_{вн} * (n - 2) =$$

$$=3,59 *11,5 + 9,84*11,5 + 7,4*11,5 *(2 - 2) = 154,5 \text{ кН} \quad (2.20)$$

де $q_{\text{пок}}^{\text{роз}}$, $q_{\text{пер}}^{\text{роз}}$ - розрахункові навантаження на 1 м^2 відповідно покриття та перекриття; $A_{\text{вн}}$ - вантажна площа простінка; n – число поверхів.

$$A_{вн} = 2,5 * 4,6 = 11,5м^2 \quad (2.21)$$

Навантаження від перекриття, розташованого над розглянутим поверхом за формулою 2.22:

$$F_1 = q_{\text{пер}}^{\text{роз}} * A_{вн} = 7,4 * 11,5 = 85,1 кН \quad (2.22)$$

Розрахункова поздовжня сила у перерізі 1 - 1 за формулою 2.23:

$$N_{1\text{-}1} = N_1 + F + F_1 + \Delta F = 249,7 + 154,5 + 85,1 = 489,4 кН \quad (2.23)$$

Відстань від точки застосування опорної реакції до внутрішньої грані стіни e_3 при закладенні плит в кладку на глибину t = 140 мм.

2.7.3 Перевірка несучої здатності простінка

Висота стиснутої частини поперечного перерізу простінка за формулою 2.24:

$$h_c = h = 380мм \quad (2.24)$$

Гнучкість стиснутої частини поперечного перерізу простінка за формулою 2.25:

$$\lambda_{h_c} = \frac{l_0}{h_c} = \frac{3000}{380} = 7.8 \quad (2.25)$$

Коефіцієнт поздовжнього вигину всього перерізу простінка в площині дії згинального моменту: при λ_h = 11,8, φ = 0,86.

Коефіцієнт поздовжнього вигину для стиснутої частини перерізу: при $\lambda_{h_c} = 12,5$, $\varphi_c = 0,81$.

Несуча здатність простінка в перерізі 1 - 1 як центрально стисненого

елемента:

$$N < m_g RA = 1*1,3 * 908200 = 1180 кН > N_{1-1} = 464,67 кН \qquad (2.26)$$

где $m_g = 1,0$ при $h > 30$ *см.*

Висновок: несуча здатність простінка забезпечена. Армування кладки за розрахунком не потрібне. Але приймаємо конструктивне армування арматурою Ø10 кожні 5 рядів кладки.

2.8 Розрахунок стіни із застосуванням адитивних технологій у будівництві

2.8.1 Конструкції прийнятої стіни під час використання будівельного 3D принтера

Було проведено дослідження щодо вивчення можливостей друку різних конструктивних елементів. В результаті одним із найбільш оптимальних варіантів стала синусоїдальна стіна з діафрагмою жорсткості. Ця схема представлена в таблиці 2.12.

2.8.2 Вибір матеріалів, їх розрахункові характеристики

Матеріал простінка: бетон класу С16/20; міцність на стиск кг/см^2; розрахунковий опір на осьовий стиск R_b = 11.5 МПа, R_{bt} = 11.5 МПа; морозостійкість f100; водонепроникність w6; рухливість розчину П-2; модуль пружності E_d = 27,5 МПа 10-3. Щільність бетону ρ = 2300 кг/м^3, монолітна кладка.

2.8.3 Розрахункова схема, збирання навантажень, визначення зусиль

Розрахункова схема, збирання навантажень, визначення зусиль (Рисунок 2.6)

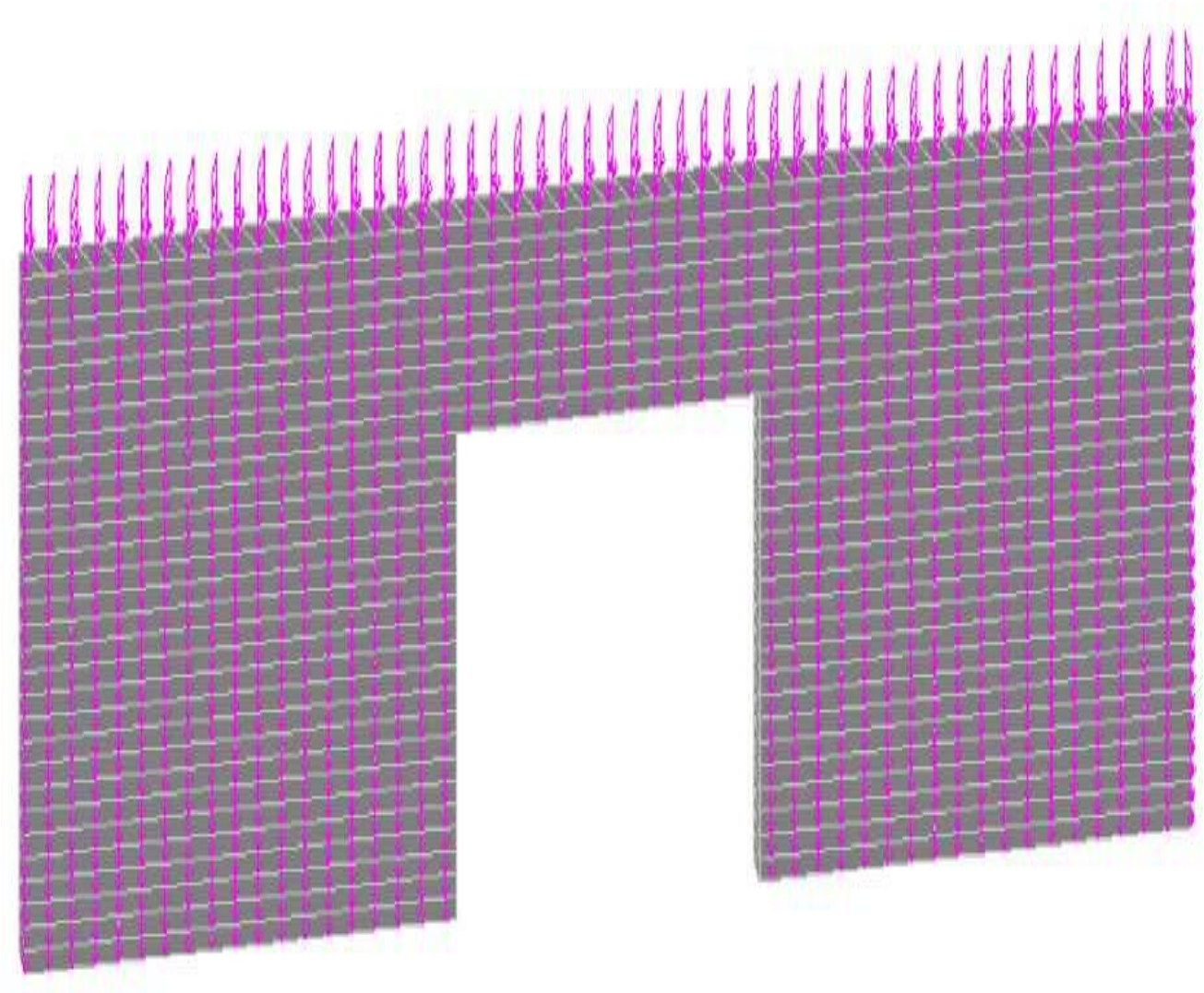


Рисунок 2.6 - Додовання вертикального навантаження до простінку

Збір навантажень на надрукований на 3D-принтері простінок наводиться у таблиці 2.10. Переміщення у розрахунковій моделі (Рисунок 2.7). Напруження в розрахунковій моделі (Рисунок 2.8).

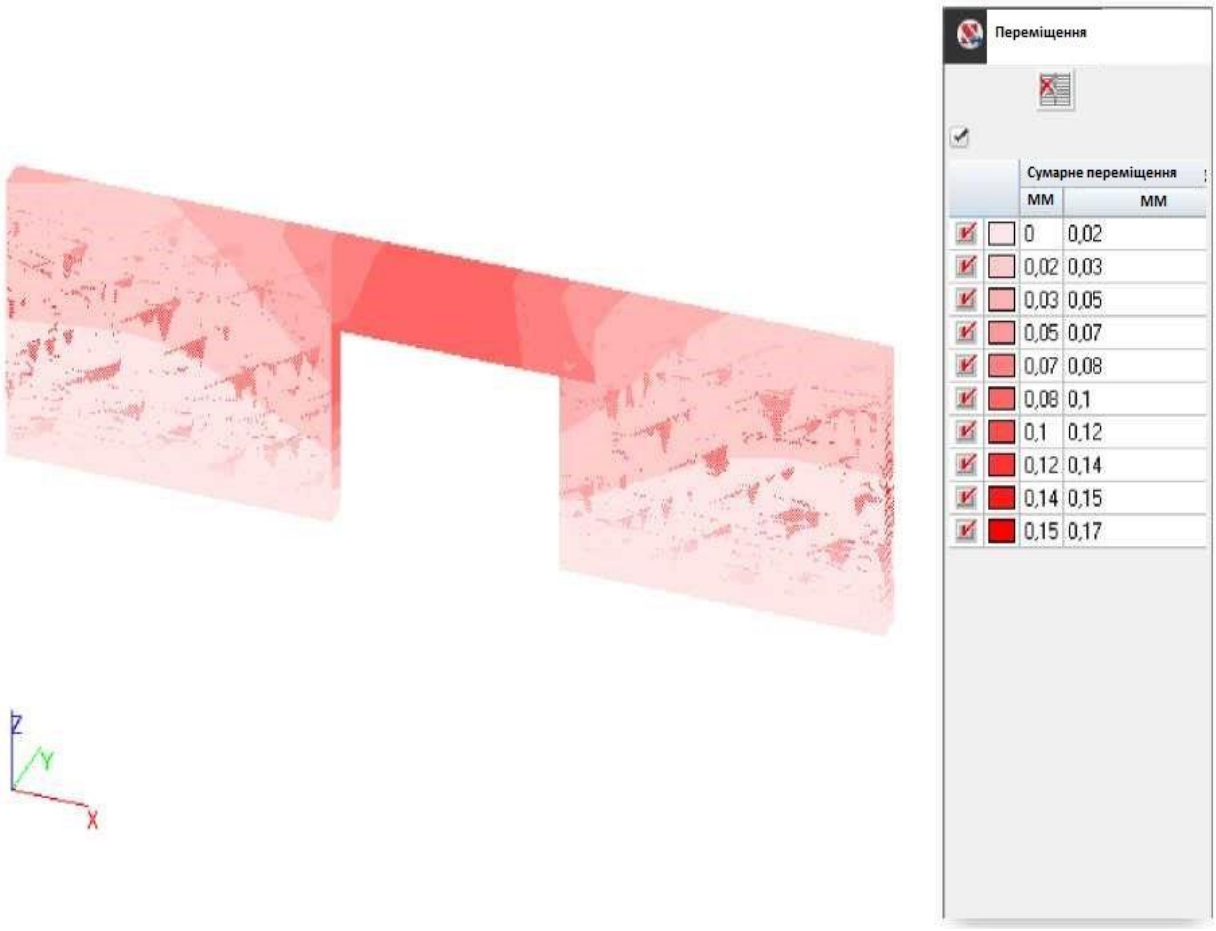


Рисунок 2.7 -Переміщення у розрахунковій моделі

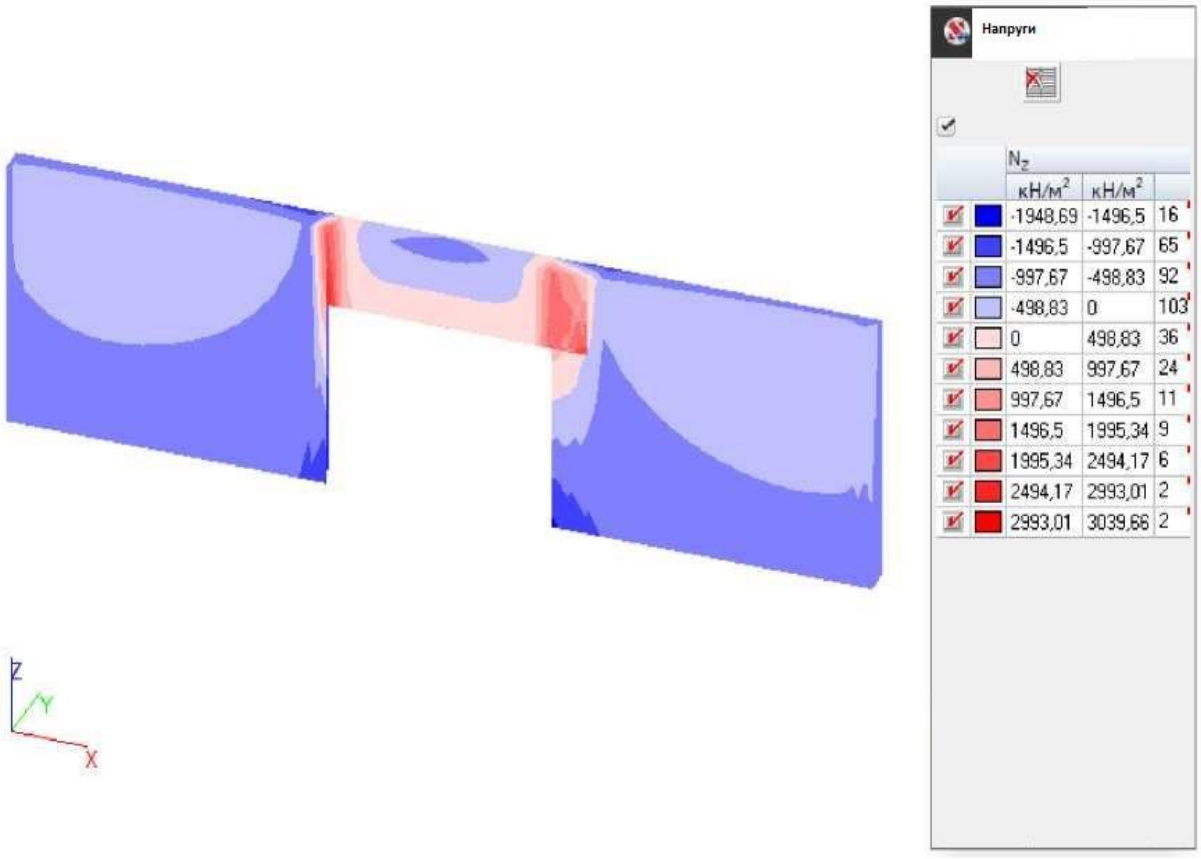
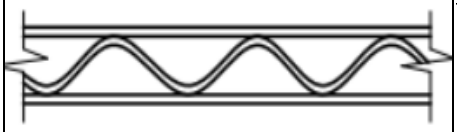
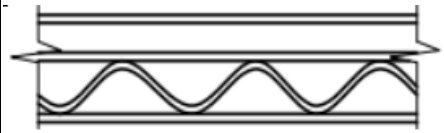
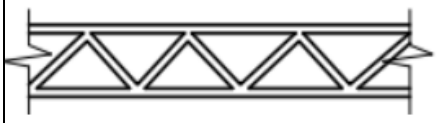
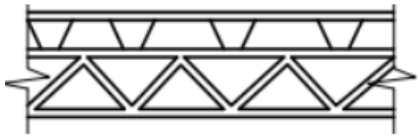
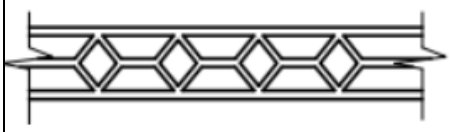
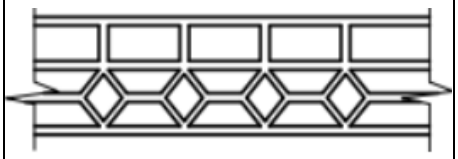
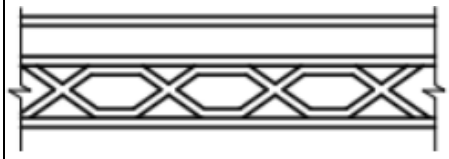
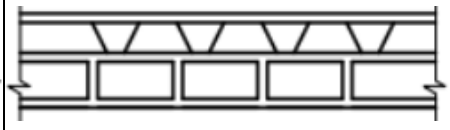


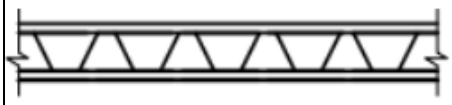
Рисунок 2.8 - Напруги у розрахунковій моделі

Вивчивши всі підготовлені моделі можна зробити такі висновки, що 3D-друк друк в малоповерховому будівництві можлива. Можливе використання незнімної опалубки як несучої частини без заповнення при використанні високоміцного бетону або бетону на основі ЦПС для малоповерхового будівництва.

2.8.4 Конструкції стін при використанні 3D принтера

Таблиця 2.12 - Варіанти стін будівель, що будуються за допомогою 3D-принтера

Діафрагма жорсткості	Однокамерна	Багатокамерна
З діафрагмою жорсткості		
Синусоїдальна		
Трикутна		
Чотирикутна		
Шестикутна		
Окремо стоячі ребра		

Без діафрагми жорсткості		
З гнучкими зв'язками (варіант 1)		_____
З гнучкими зв'язками (варіант 2)		_____
Без гнучких зв'язків		_____

2.9 Порівняння фундаменту надрукованого на будівельному 3D принтері та збірного стрічкового фундаменту

Принтер починає друк опал убки фундаменту (ростверку) майбутньої будівлі. Принтер проходить по заданій траєкторії, укладаючи шар за шаром. За печаткою робітники укладають стяжки, заставні та арматуру згідно з проектом, випуски встановлюються в кліпси і опалубка заливається важким бетоном. Після того, як бетон набирає достатню міцність, процес будівництва поновлюється.

При порівнянні цих фундаментів можна зробити такі висновки, що при друкованому варіанті фундаментів:

1) утворюється менше побутових відходів.

2) У рази зменшується час зведення.

3) Зменшується бригада робочих, оскільки у цьому процесі потрібно лише оператор і кілька робочих контролю якості печати.

4) Зменшується кошторисна вартість будівництва.

2.10 Висновки щодо порівняльного аналізу основних вертикальних несучих конструкцій

Завдяки зробленому порівняльному аналізу, було з'ясовано, що за несучою здатністю та теплотехнічними характеристиками кістяок будівлі надрукований на 3D принтері анітрохи не поступається цегляному кістяку будівлі, а багато в чому навіть перевершує його. Так наприклад виходячи з теплотехнічних розрахунків основних вертикальних несучих конструкцій першого і другого варіантів видно, що при застосуванні будівельного 3D друку товщину конструкцій, що захищають, можна звести до мінімуму за рахунок розташування утеплювача в порожнині стіни. Інші порівняльні показники представлені у таблиці 2.13.

Таблица 2.13 - Сравнительные характеристики

1 варіант (цегляний кістяк будівлі)	2 варіант (кістяк надрукований на 3D-принтері)
1	2
1.Сміття на будмайданчику 2.Додаткові інструменти та будматеріали 3. Необхідність додаткового утеплення	1. Утворюється менше побутових відходів 2. У рази зменшується час на зведення 3. Зменшується бригада робочих, оскільки у цьому процесі потрібно лише оператор і кілька робочих контролю якості друку 4. Мінімальні вантажно-розвантажувальні роботи

РОЗДІЛ 3
ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ

3.1 Аналіз застосовуваних складів для пошарового укладання бетонної суміші будівельним 3D-принтером

Сьогодні для адитивних технологій використовується широкий спектр матеріалів, серед яких полімери, гуми, порошки сталі, сплави титану, нікелю, алюмінію, міді, інструментальні та конструкційні кераміки, біосумісні та нанозміцнені композити. Основна сфера їх застосування охоплює машинобудування, авіаційну та автомобільну промисловість, виробництво товарів масового споживання та медичних виробів. Зокрема, значний прорив спостерігається у використанні тривимірного друку для створення ендопротезів та екзоскелетів. У той же час у будівництві адитивні технології ще не отримали широкого впровадження, а відповідні матеріали знаходяться на стадії розробки.

Одним із прикладів є технологія Branch, що використовується командою з Чаттануги (штат Теннессі, США). Вона передбачає застосування швидкого робота, який створює конструкції з ABS-пластику, армованого вуглецевим волокном. Такі конструкції можуть мати складні архітектурні форми. На будівельному майданчику вони доповнюються традиційними матеріалами, такими як бетон, штукатурка та монтажна піна, з використанням звичайних будівельних інструментів. Однак ця технологія наразі не придатна для зведення несучих стін та відповідальних конструкцій.

Цементні склади, які твердіють тривалий час, не можуть задовольнити вимоги продуктивності 3D-принтера [19]. Склад повинен бути тиксотропним, тобто зменшувати в'язкість від механічного впливу та збільшувати в'язкість у стані спокою. Можливе рішення для будівельного друку - сірчистий бетон, який є композитним матеріалом, виготовленим із сірки та заповнювача. Суміш нагрівають вище за температуру плавлення сірки. Після охолодження бетон

досягає заданої міцності без тривалого твердіння [55].

Звичайний цементний бетон не відповідає вимогам для будівельного 3D-друку [56]. Для оптимізації процесу тривимірного друку необхідно враховувати дві ключові умови. По-перше, зі збільшенням інтервалу між укладанням шарів знижується сила зчеплення між ними [35]. По-друге, матеріал повинен достатньо швидко набирати міцність, щоб витримувати вагу наступних шарів без деформацій. Через це необхідність витримування раніше надрукованих шарів може уповільнювати будівництво. Оптимальне вирішення цих обмежень лежить у балансуванні швидкості друку: час між нанесенням шарів має бути достатнім для досягнення необхідної міцності, але водночас досить коротким для забезпечення надійного зчеплення між ними [57].

Здатність шарів витримувати власну вагу прямо пропорційна межі плинності матеріалу [51, 58]. У процесі пошарового зведення стін перший шар зазнає найбільшого навантаження. Щоб забезпечити стабільність конструкції, межа плинності повинна бути достатньо високою для витримування цього навантаження, але матеріал повинен залишатися достатньо рідким для екструзії [59]. Таким чином, для успішного друку необхідно збалансувати плинність матеріалу при подачі через екструдер і його стабільність після нанесення. Відомо, що межа плинності цементних матеріалів зростає з часом у стані спокою.

Французькі вчені встановили [58], що зміна межі плинності протягом перших 40 хвилин має лінійний характер (модель Русселя) [61], тоді як для більш тривалого періоду краще підходить модель Перро та співавторів. У своїх експериментах вони використовували суміш, що складалася з 50% цементу, 25% вапняку і 25% метакаоліну, при водоцементному співвідношенні 0,41. Як суперпластифікатор застосовували полікарбоксилат у кількості 0,3% від маси цементу. Початкова межа плинності суміші склала 4 кПа, що відповідає діапазону, необхідному для матеріалів, розроблених для технології Contour Crafting у Південній Каліфорнії.

Додавання вапняку як наповнювача підвищує міцність матеріалу на стиск і вигин, а також покращує його оброблюваність, що особливо важливо під час екструзії бетону. Метакаолін, у свою чергу, позитивно впливає на властивості бетонних і розчинних сумішей. Завдяки своїм дрібним частинкам, які можуть розташовуватися між цементними зернами, він формує пастоподібну структуру, що зменшує водовідділення і сприяє створенню більш однорідної мікроструктури. Використання метакаоліну у складі цементу підвищує міцність і довговічність матеріалу. Крім того, його часткова заміна цементу зменшує обсяг пір у бетоні, що підвищує його морозостійкість.

Полікарбоксилати демонструють триваліший пластифікувальний ефект, збільшуючи час дії в 3–4 рази порівняно з традиційними добавками, такими як сульфомеланінові, сульфонафталінові формальдегіди або лігносульфонати. Це дозволяє не лише підвищити рухливість бетонної суміші на ранніх етапах, але й зберігати її працездатність протягом тривалого часу, що є важливою перевагою для подачі матеріалу через екструдер.

Вчені університету Лафборо активно досліджують властивості бетонних сумішей для 3D-друку [51]. Їх команда створила повномасштабний зразок конструкції під назвою "Чудова лавка" (Wonder Bench), розміром 1 х 2 х 0,8 м. Для цієї конструкції була розроблена спеціальна бетонна суміш, яка легко перекачується насосом, підходить для екструзії і здатна витримувати навантаження. Хоча повний склад суміші не розголошується, відомо, що її компоненти включають 54% піску, 36% хімічно активних цементних речовин і 10% води. Дослідники зазначили, що міцність отриманого матеріалу становила 95% від міцності традиційного бетону.

Також британські дослідники розробляли бетонні суміші для високопродуктивного друку. Один із таких складів включає пісок і в’яжучу речовину у співвідношенні 3:2, де в’яжуча речовина складається з 70% цементу, 20% золи винесення і 10% мікрокремнезему. Крім того, до складу додавали 1,2 кг поліпропіленових волокон на 1 м³, суперпластифікатор і

сповільнювач схоплювання у дозуванні 1% і 0,5% відповідно до маси. Водоцементне співвідношення в цій суміші становило 0,26.

Додавання мікрокремнезему до складу бетону забезпечує більш щільну структуру, підвищує міцність на вигин і зменшує проникність матеріалу. Поліпропіленові волокна, взаємодіючи із золою винесення, знижують усадку бетону під час висихання. Однак їх присутність знижує зручність роботи з сумішшю. Для вирішення цієї проблеми використання суперпластифікатора забезпечує необхідну пластичність, що дозволяє матеріалу легко піддаватися екструзії.

Описана бетонна суміш була успішно надрукована через сопло діаметром 9 мм із послідовним нанесенням 61 шару за одну сесію без видимої деформації нижніх шарів. Суміш залишалася придатною для використання до 100 хвилин. Міцність на стиск цієї суміші у віці 28 днів перевищила очікування, досягнувши 110 МПа [51].

У 2016 році вчені Американського університету Бейрута (Ліван) створили суміш, яка забезпечує високу якість екструзії та необхідну міцність для 3D-друку в будівництві. Оптимальний склад включав 125 г цементу, 80 г піску, 160 г дрібного заповнювача, водоцементне співвідношення 0,39, а також 1 мл суперпластифікатора і 0,625 мл сповільнювача схоплювання. Суміш демонструвала міцність на стиск близько 42 МПа.

Китайська компанія Winsun, лідер у сфері 3D-друку, використовує інноваційний склад Crazy Magic Stone, міцність якого в 4–5 разів перевищує міцність природного каменю. Високі механічні характеристики забезпечуються обробленим кварцовим піском і спеціальною фіброю. Крім того, Winsun активно застосовує гіпсові матеріали зі скловолокном (Glass Fiber Reinforced Gypsum, GFRG), що містять 3–25% фібри довжиною 1–13 см і діаметром 5,8–100 мкм. Водогіпсове співвідношення таких сумішей коливається від 0,25 до 0,60. Завдяки скловолокну підвищується тріщиностійкість матеріалу, його пластичність і зручність у роботі. У

композитах зі скловолокном напруги розтягування сприймаються фіброю, що значно збільшує опірність матеріалу розтягуванню та вигину.

Інтерес до розробки складів для 3D-друку в будівництві зростає у всьому світі. У багатьох країнах вже ведуться активні дослідження для впровадження 3D-друку в будівництво. Сьогодні низка компаній досягла значних результатів у цій галузі, що підтверджується відповідними розробками та практичним використанням.

Таблиця 3.1-Добавки до складу поліпшуючі властивості бетону

Добавки до складу сумішей	Результат	Рекомендований відсоток
1	2	3
Полікарбоксилат	Поліпшення початкової межі плинності	0.3
Вапняк	Підвищує міцність матеріалу на стиск і вигин, а також покращує зручність укладання бетону, що особливо цінно при екструзії бетону	-
Метакаолін	При введенні його в цемент підвищує міцність і довговічність, крім того, часткова заміна цементу метакаоліном в цементному розчині та бетоні знижує обсяг пір, що сприяє підвищенню морозостійкості	-
Мікрокремнезем	Приводить до більш щільної структури бетону, підвищення міцності на вигин, зменшення проникності структури	10

1	2	3
Бентонітова глина	Прискорює процес осідання часток, що каламутять, деякою мірою абсорбує речовини, які є окислювачами в даному продукті	6
Гашене вапно	Покращує пластичність готової суміші, а також збільшує її стійкість до атмосферних впливів зовнішнього середовища	5.5
Мідний купорос	Покращує зчеплення бетонної суміші	1
Поліпропіленова мікрофібра	Працює як армуючий матеріал, а так само стримує усадкові тріщини	0.69
Кварцитопіщанник	Покращує якості міцності готових розчинних сумішей	8.33
Гіпс	Поліпшує пластичність розчинової суміші	1.23
Базальтова фібра	Працює як армуючий матеріал, а так само стримує усадкові тріщини	0.74
Зола-унос	Покращує хімічні характеристики цементу	9.9
Суперпластифікатор ПФМ-НЛК	Добавка застосовуватися в бетонних та розчинних сумішах, як пластифікуюча	0.76
Murapor Kombi 756	Добавка застосовуватися в бетонних та розчинних сумішах, як пластифікуюча	0.18
Centrament H10 conc	Добавка застосовуватися в бетонних та розчинних сумішах, як пластифікуюча	0.5 - 1.5
Centrament H18	Добавка пластифікатор для бетонів та розчинів	0.5 - 1.5
Centrament P40	Покращує зручність бетонної суміші. При однаковій консистенції можливе значне зниження вмісту води в бетонній суміші, зниження водоцементного відношення та за рахунок цього досягнення більш високої щільності, міцності та довговічності бетону.	0.2 - 1.5

1	2	3
Centrament Stabi 520	Стабілізуюча добавка для бетонів і розчинів є рідиною і може дозуватися звичайними дозаторами	0.2 - 1.5
MC-RAPID 217N	При бетонуванні рекомендується використовувати композиції з мінімально можливим В/Ц за рахунок використання комплексного ефекту добавки	0.2 - 4.0
MC- TechniFlow 75	Використовується як для підвищення зручності укладання сумішей, так і для зниження витрати цементу або підвищення міцності бетону	0.7 - 2.0
MC-TechniFlow 173konz	Добавка використовується як для підвищення зручності укладання сумішей, так і для зниження витрати цементу або підвищення міцності бетону	0.2 - 5.0
MC-TechniFlow 179H	Добавка використовується як для підвищення зручності укладання сумішей, так і для зниження витрати цементу або підвищення міцності бетону.	0.2 - 4.0
Muraplast FK 48	Найбільший ефект дії добавки досягається при її додаванні до бетонної суміші після короткого перемішування інших компонентів бетонної суміші з водою замішування	0.2 - 2.0
Muraplast FK 49	Найбільший ефект дії добавки досягається при її додаванні до бетонної суміші після короткого перемішування інших компонентів бетонної суміші з водою замішування	0.2 - 2.0

1	2	3
MURAPOR KOMBI 754	Murapor Kombi 754 рекомендується використовувати для отримання якісних розчинів кладок, у тому числі з тривалою життєздатністю. Черговість дозування добавки не обмежується. Добавка вводиться як з водою замішування, так і після. Добавка ефективна за низьких витрат цементу. При введенні добавки значно знижується витрата води замішування для отримання необхідної пластичності.	0.2 - 1.5
MURAPOR KOMBI 756R	Murapor Kombi 756R рекомендується використовувати для отримання якісних розчинів кладок, у тому числі з тривалою життєздатністю. Черговість дозування добавки не обмежується. Добавка вводиться як з водою замішування, так і після. Добавка ефективна за низьких витрат цементу. При введенні добавки значно знижується витрата замішування води для отримання необхідної пластичності.	0.2 - 1.5

3.2 Підбір складу для будівельного 3D-принтера

У ході аналітичного підбору було обрано оптимальний склад робочої суміші для технології пошарового укладання із застосуванням будівельного 3D-принтера (Таблиця 3.2). Таблиця з аналізом найбільш підходящого складу для будівельного 3D-принтера з існуючих .

Таблиця 3.2-Склад бетонної суміші для будівельного 3D-принтера

Склад	Витрата мас. %	Заплановані властивості						
		Межа міцності при стисканні, Rc МПа	Межа міцності на розтяг при вигині, Rp МПа	Щільність, г/м^3	Рухливість по розпливу кільця, см	Рухливість приладу Віка (h до низу), мм	Рухливість занурення конуса, мм	Терміни схоплювання, година. хв
В/Ц	0,02	52,0	7,8	2,050	6,75	9	5	2,4-3
Цемент	23,5							
Пісок	50,33							
Вода	15,5							
Зола-унос	6,72							
МКР	-							
ВМК	3,36							
Вапно гашене	-							
Фібра	0,07							
St. RS	-							
St. 1267	0,5							

3.3 Технологічна карта на зведення вертикальних несучих конструкцій із застосуванням адитивних технологій

Область застосування.

Технологічна карта (ТК) розроблена на комплекс робіт із укладання бетонної суміші будівельним 3D-принтером у монолітну залізобетонну конструкцію.

Технологічна карта призначена для використання при розробці Проектів провадження робіт (ППР) а також з метою ознайомлення робітників та інженерно-технічних працівників з правилами виробництва бетонних робіт.

Мета створення представленої ТК дати рекомендовану схему технологічного процесу з проведення бетонних робіт, показати склад та зміст ТК.

Нормативною базою розробки технологічних карт є: ДБН,ДСТУ виробничі норми витрати матеріалів, місцеві прогресивні норми і розцінки, норми витрат праці, норми витрат матеріально-технічних ресурсів.

Застосування ТК сприяє покращенню організації виробництва, підвищенню продуктивності праці та її наукової організації, зниженню собівартості, поліпшенню якості та скорочення тривалості будівництва, безпечному виконанню робіт, організації ритмічної роботи, раціональному використанню трудових ресурсів та машин, а також скороченню термінів розробки ППР та уніфікації технологічних рішень .

До складу робіт, що послідовно виконуються під час виконання бетонних робіт, входять:

- геодезичні розбивні роботи;
- подача бетонної суміші;
- укладання бетонної суміші.

Машини та обладнання.

У ВКРМ використовується будівельний 3D принтер баштового типу з такими основними технічними характеристиками:

- розташування всередині об'єкта, що зводиться; - конструктивна схема за типом баштового крана з кареткою, що рухається по стрілі;

- площа спорудженого об'єкта без перестановки – 312 м^2;

- радіус робочої зони повнорозмірної моделі - 7 м, тому що радіуса робочої зони принтера мало, буде 2 стоянки.

- максимальна висота підйому робочого органу над точкою – не менше 3500 мм;

- прийнятна робоча швидкість руху – не менше 12 м/хв;

- стабілізація по горизонту;

- точність позиціонування робочого органу – ±0,5 мм;

- можливість використання для перевезення стандартної будівельної техніки;

- монтаж установки протягом менше 1 години від початку робіт до повної готовності до роботи;

- можливість зміни витрати будівельної суміші в залежності від швидкості друку.

Організація та виконання робіт.

До початку бетонних робіт мають бути виконані такі заходи:

- призначено особу, відповідальну за якісне та безпечне проведення робіт;

- проінструктовано членів бригади з техніки безпеки, включаючи інструктаж з безпеки робіт в охоронних зонах діючих трубопроводів та ЛЕП;

- змонтовано об'ємний арматурний каркас;

- здійснено геодезичну розбивку для укладання бетонної суміші;

- позначені шляхи руху автобетонозмішувачів та робоча стоянка будівельного 3D-принтера;

- доставлені в зону виконання робіт необхідні монтажні пристрої, інвентар;

- інструменти та побутовий вагончик для відпочинку робітників.

Під'їзні шляхи та дороги до монтажного майданчика мають бути

споруджені до початку бетонних робіт та забезпечувати вільний доступ транспортних засобів.

Відповідальний за безпечне виконання робіт автобетононасосом, повинен прийняти під'їзні шляхи та дороги до монтажного майданчика, а також основу самого майданчика.

При прийманні підстави майданчика особа, відповідальна за виконання робіт, має переконатися, що:

- основа майданчика здатна витримувати навантаження до 0,4-0,5 МПа. Міцність основи майданчика слід перевіряти будь-яким сучасним методом. При свіжонасипаному, не утрамбованому грунті він має бути ущільнений;

- основа майданчика стійка до впливу місцевих кліматичних факторів (не втрачає несучої здатності при сильних опадів, зберігає свою придатність при сильних морозах або спеку тощо);

- має водовідведення;

- поперечний та поздовжній ухили майданчика не повинні перевищувати значень, зазначених у паспорті автобетононасосу та не повинні перевищувати 5°;

-для під'їзних шляхів поздовжній ухил не повинен перевищувати 0,09.

Ширина проїжджої частини під'їзних колій має бути не менше 4 м, ширина узбіччя - не менше 0,75 м.Під'їзні шляхи облаштовані дорожніми знаками "в'їзд", "виїзд", "розворот", "обмеження швидкості";

-поверхня майданчика та під'їзних шляхів має бути рівною, без западин, хвиль та пагорбів.

Просвіт під рейкою довжиною 3 м у поздовжньому та поперечному напрямках не повинен перевищувати 30-50 мм;

-монтажний майданчик, ділянки робіт, робочі місця, проїзди та підходи до них повинні мати освітленість, що характеризується такими нормами:

- найменша освітленість – 10 лк;

- висота підвіски лампи - 5 м;

- потужність світильників зовнішнього освітлення типу "Н" - 2 лампи по

300 Вт

- Це приймання слід проводити за Актом здачі підстави монтажного майданчика та під'їзних шляхів до нього.

Процес укладання бетонної суміші складається з робочих операцій, пов'язаних з подачею її в опалубку та ущільнення. До початку укладання бетонної суміші в опалубку необхідно перевірити:

- якість очищення арматури від нальоту іржі;

- правильність встановлення арматурних конструкцій та заставних деталей;

- ретельність очищення бетонної підготовки від цементної плівки;

- винесення осей споруди (фарбою) на арматурний каркас.

3.4 Висновки щодо організаційно-технологічних рішень

У цьому розділі випускної каліфікаційної роботи було проведено аналіз складів для будівельного 3D-принтера з існуючих. Розглянуто добавки до складів, що покращують властивості бетону. У ході аналітичного підбору було обрано оптимальний склад робочої суміші для технології пошарового укладання із застосуванням будівельного 3D-принтера. Крім цього, було запропоновано технологічну карту на зведення вертикальних несучих конструкцій із застосуванням адитивних технологій.

Отримані дані при аналізі складів та різних добавок для будівельного 3D принтера можуть бути вихідними даними для виведення більш універсального складу, який би підходив під різні кліматичні умови.

Також результати виконаної роботи можуть використовуватися надалі як аналіз для написання та складання методичних рекомендацій, складання нормативної та технічної літератури для проектування будинків із застосуванням будівельного 3D друку.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведений літературно-критичний огляд показав, що будівельні адитивні технології активно розвиваються у всьому світі, включно з Україною. Актуальним викликом залишається відсутність нормативної та законодавчої бази для будівництва за допомогою 3D-принтерів, що обмежує їх використання у масштабному будівництві. Саме через це великі будівельні компанії не впроваджують ці пристрої у свою практику.

2. На даний момент будівельні 3D-принтери здебільшого застосовуються для малоповерхового та малогабаритного індивідуального будівництва, а також для створення малих архітектурних форм.

3. Відсутність універсальної суміші для 3D-друку обумовлена використанням різними виробниками різних складів бетонних сумішей, які варіюються за складом компонентів та їх пропорціями.

4. У рамках порівняльного аналізу несучих конструкцій було розглянуто два варіанти фундаментів індивідуального двоповерхового житлового будинку на шість осіб: перший варіант із цегляним каркасом та другий – із каркасом, надрукованим на 3D-принтері. У ході дослідження проведено розрахунок стін для обох варіантів.

5. Виконано дослідження друку різних конструкцій стін за допомогою будівельного 3D-принтера. Найбільш оптимальним виявився варіант синусоїдальної стіни з діафрагмою жорсткості. Також проведено теплотехнічний розрахунок огороджувальних конструкцій такої стіни.

6. Проведено аналіз існуючих складів для будівельного 3D-друку та розглянуто добавки, які покращують властивості бетонних сумішей. У результаті аналітичного підбору обрано оптимальний склад робочої суміші для технології пошарового укладання матеріалу.

7. Результати дослідження можуть стати основою для створення методичних рекомендацій, розробки нормативної та технічної документації для проектування будівель із застосуванням технології будівельного 3D-друку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Комишев Д. Г. Інноваційні технології в будівництві: 3D-друк будівель, мобільні програми та штучний інтелект / Д. Г. Комишев, А. О. Бєлятинський // Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць. - Рівне : НУВГП, 2023. Вип. 4(104). С. 22-43.

2. Андрійчук О.В., Оласюк П.Я. Застосування 3D-технологій у будівництві. Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві. 2015. Вип. 3. С. 11–18.

3. Згалат-Лозинська Л.О., Згалат-Лозинський О.Б. Розвиток та впровадження інноваційних технологій 3D друку у будівництві. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Економі управління. 2020. Том 31 (70). №5. С.45-51. DOI: https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-5-7

4. Струтинська О. В. Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування / О. В. Струтинська // Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2 : Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. 2018. № 20. С. 88-94.

5. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward – looking review / D. Delgado, P. Clayton, W.J. O'Brien, C. Seepersad, M. Juenger, R. Ferron, S. Salamone. Automation in Construction. 2018. № 89. P. 110–119. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517307847

6. Additive manufacturing evolution in construction: From individual terrestrial to collective, aerial, and extraterrestrial applications / Kamran Aghaee , Linfei Li , Alireza Roshan , Parsa Namakiaraghi . Journal of Building Engineering. 2024. № 96. P. xxx. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224019570

7. Іванов-Костецький С., Гуменник І., Воронкова І. Шляхи застосування технологій 3D-друку у створенні сучасних об'єктів архітектури.

// Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Архітектура. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2022. Том 4 (1). № 1 (7). С. 95–107.

8. Дослідження варіантних рішень обладнання для 3D-друку будівельних виробів овацій / С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. І. Голубченко О. І. та ін. // Український журнал будівництва та архітектури. 2022. № 1. С. 80-88

9. Шатов С. В., Савицький М. В., Марченко І. О. Удосконалення обладнання 3D-друку об’єктів. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2019. Вип. 6. С. 90–101.

10. Wolfs R. J. M., Boss F. P., Salet T. A. M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 119. Pp. 132-140. URL: https://doi. org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017.

11. Кірик, К., Журавська, Н., & Стефанович, П. (2023). ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ 3D БУДІВНИЦТВА ТА ЙОГО ВПЛИВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ. *SWorldJournal*, *1*(18-01), 77–87. https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-18-01-076

12. Hull C. W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography : пат. 4575330 США. 1986.

13. Chen L. et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. С.1-10.

14. Ibrahim M. I. M. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects. Sustainable Cities and Society. 2016. No.23. С. 78-93.

15. Wong K. V., Hernandez A. A review of additive manufacturing. ISRN Mechanical Engineering. 2012. Т. 2012

16. Kuchler S. Additive Technology and Material Cognition: A View from Anthropology. Journal of Cognition and Culture. 2014. Т.14. №.5. С.385399.

17. Herderick E. D. Additive Manufacturing in the Minerals, Metals, and Materials Community: Past, Present, and Exciting Future. JOM. 2016. T.68. No. 3. C.721-723.

18. Bos F. et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping. 2016. T.11. №.3. C.209-225

19. L. Xi-Qiang, L. Jing-Fang, Z. Tao, H. Liang, Z. Nan, L. Juan, L. Guoyou. Cement-based composite material used for 3D printing technology as well as preparation method and application thereof: пат. CN104310918A. 2014

20. Y. Tianrong, L Qiaoling. 3D printing cement-based material and preparation method thereof: пат. CN104891891A. 2015

21. F. Peng, M. Xinmiao. Fiber reinforced composite material reinforced 3D (three-dimensional) printing structure: пат. CN104309126A. 2014

22. L. Fu-Cai, W. Yi-Yuan, X. Min, L. Bin, Z. Xin-Zhen, H. Ming. High-performance powder concrete for 3D (threedimensional) printing: пат. CN104961411A. 2015.

23. Khoshnevis B. Contour crafting extrusion nozzles: пат. US14/961,071. 2015.

24. Dini E. Method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus therefor : пат. US8337736. 2012.

25. Dini E., Chiarugi M., Nannini R. Method and device for building automatically conglomerate structures : пат. 11/908,993 США. 2006.

26. Campbell T., C. Williams, O. Ivanova. Could 3D printing change the world. Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, Atlantic Council, Washington, DC. 2011.

27. Kobryn P. A., Semiatin S. L. The laser additive manufacture of Ti- 6Al-4V. JOM. 2001. T. 53. No. 9. C. 40-42.

28. Brennan-Craddock J. et al. The design of impact absorbing structures for additive manufacture. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2012. T. 382. №. 1.

29. Klammert U. et al. Cytocompatibility of brushite and monetite cell culture scaffolds made by three-dimensional powder printing. Acta Biomaterialia. 2009. T. 5. No. 2. C. 727-734.

30. Lim S. et al. Fabricating construction components using layered manufacturing technology. Global Innovation in Construction Conference. 2009. C. 512-520.

31. Horbach S. et al. Building blocks for adaptable factory systems. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2011. Vol. 27. No. 4. C. 735-740.

32. Muller E. Building Blocks as an Approach for the Planning of Adaptable Production Systems. Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics. Springer Berlin Heidelberg, 2010. C. 37-45.

33. Gibson I., Rosen D, Stucker B. Additive manufacturing technologies. New York: Springer, 2010. T.238.

34. Johnston, W. D. Design and Construction of Concrete Formwork. E. G.. Nawy (ed.), Concrete Construction Engineering Handbook. CRC Press, 2008. 7-1-7-49.

35. Lloret E. et al. Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. ComputerAided Design. 2015. No.60. C. 4049.

36. Khoshnevis B. et al. Mega-scale fabrication by contour crafting. International Journal of Industrial and Systems Engineering. 2006. T.1. №.3. C.301-320.

37. N. Ramachandran, A. Gale. Space colonization. Aerospace America. 2008. T. 46, No.12, C. 77.

38. Pegna, J. Construction automation: Are we solving the wrong problem? RPI/RDRC Technical Report 92010. 1992

39. Pegna J. Exploratory investigation of solid freeform construction. Automation in construction. 1997. T. 5. No. 5. C. 427-437.

40. Khoshnevis B., Dutton R. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. Materials Technology. 1998. T.13. №.2. C.53-56.

41. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. Automation in construction. 2004. T. 13. No. 1. C. 5-19.

42. Hwang D., Khoshnevis B. Concrete wall fabrication by contour crafting. 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004), Jeju, South Korea. 2004.

43. Perkins I., Skitmore M. Three-dimensional printing in the construction industry: A review. International Journal of Construction Management. 2015. T.15. №.1. C. 1-9.

44. Gardiner J. Exploring the emerging design territory of construction 3D printing-project led architectural research. 2011. 382c.

45. Tay Y. W. et al. Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing. Materials Science Forum. - 2016. - Vol. 861. C. 177-181.

46. Lim S. et al. Development of a viable concrete printing process. 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2011. C. 665-670.

47. Buswell R. A. et al. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. Automation in construction. 2007. Vol. 16. No. 2. C. 224-231.

48. Buswell R. A. et al. Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. Automation in Construction. 2008. Vol. 17. No. 8. C. 923-929.

49. Mahapatra S. S., Panda B. N. Benchmarking of rapid prototyping systems using grey relational analysis. International Journal of Services and Operations Management. 2013. Vol. 16. No. 4. C. 460-477.

50. Lim S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in construction. 2012. T. 21. C. 262-268.

51. Le T. T. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Materials and structures. 2012. T. 45. No. 8. C. 1221-1232.

52. Laurent, P., Erica, M., Laurent, F. and Safaa, M. Advanced building

materials, Bus. Innovaion Obs. 2014. Pp. 2-14.

53. Tibaut A., Rebolj D., Perc M. N. Interoperability requirements for automated manufacturing systems in construction. Journal of Intelligent Manufacturing. 2016. T. 27. No. 1. Pp. 251-262.

54. Cesaretti G. et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. Acta Astronautica. 2014. T. 93. C. 430-450.

55. Grugel R. N., Toutanji H. Sulfur “concrete” for lunar applications-Sublimation concerns. Advances in Space Research. 2008. T. 41. No. 1. C. 103112.

56. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? Procedia Engineering. 2016. No. 151. C. 292-299.

57. Le T. T. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. Cement and Concrete Research. 2012. T. 42. No. 3. C. 558-566.

58. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures. 2016. T. 49. No. 4. C. 1213-1220.

59. Shahab A. R. et al. Smart dynamic casting or how to exploit the liquid to solid transition in cementitious materials //Proceedings CD od the 1st international conference on rheology and processing of construction materials and of the 7th international conference on self-compacting concrete, Paris, France. 2013.

60. Perrot A. et al. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behaviour of high yield stress fluids atlow strain rate. Rheologica acta. 2012. T. 51. No. 8. C. 743-754.

61. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. Cement and Concrete Research. – 2006. T. 36. No. 10. C. 1797-1806.

62. Струтинська О.В. Напрями використання технологій тривимірного друкування у процесі підготовки майбутніх учителів інформатики / О.В. Струтинська // Теорія і практика використання

інформаційних технологій в навчальному процесі: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 30-31 травня 2017 р., м. Київ. : Вид-во НПУ імені М.П. Драгоманова, 2017. С. 125-127.

63. Савицький М., Айріх Ш., Халаф І. та ін. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3D-друку будівельних об'єктів : колективна монографія; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. Савицького. Дніпро : ФОП Удовиченко О. М., 2019. 233 с.

64. Гріщенко Д. О. Інноваційні будівельні матеріали [Електронний ресурс] / Д. О. Гріщенко, В. П. Ковальський // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці:дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)», Вінниця, 22 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. 2023. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2023/paper/view/18831.

65. Горковлюк І. І., Ковальський В. П. БУДИНКИ З ЕКОЛОГІЧНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ //СУЧАСНІ СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ НАУКИ, ОСВІТИ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА СУСПІЛЬСТВА. – 2023. – С. 63.

66. Об'ємні моделі Інтернет-видання 3Ddevice. - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.epochtimes.com.ua/ru/novosti-kompaniy/3d-printery3d-pechat-ot-magazina-3ddevicecomua-123545

67. Екологічно безпечне будівництво. - [Електронний ресурс]. – Режим доступу:https://zeusceramica.com/news/view/ecodesign

68. Доцільність впровадження «зеленого будівництва» [Електронний ресурс] / М. С. Шпанюк, Є.П. Джига, В. А. Кравчук, В. П. Ковальський // Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 31 травня 2022 р. – Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу:https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/15612.

69. Очеретний В. П. Сучасні напрямки архітектури [Текст] / В. П. Очеретний, В. П. Ковальський, М. О. Постолатій // Матеріали III міжнародної

науково-практичної конференції"Прикладні науково-технічні дослідження", Івано-Франківськ, 3-5 квітня 2019 р. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2019. С. 150.

70. Розвиток та впровадження инноваційних технологій 3d-друку у будівництві. - [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/344822499_ROZVITOK_TA_VPROVADZENNA_INNOVACIJNIH_TEHNOLOGIJ_3D-DRUKU_U_BUDIVNICTVI

71. Сучасні механізми розвитку інновацій в будівельній галузі. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://visnykj.wunu.edu.ua/index.php/htneu/article/viewFile/1128/1231

72. Проблеми та перспективи розвитку підприємств будівельної галузі. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://snku.krok.edu.ua/index.php/vcheni-zapiski-universitetu-krok/article/view/302

73. Зведення екологічних будівель. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.epravda.com.ua/columns/2019/11/25/654086/

74. Петришина А.А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього. Актуальні задачі сучасних технологій : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів (25-26 листопада 2015 р.). Тернопіль, 2015. С. 26–27.