

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет будівництва та транспорту**  
**Кафедра Будівництва та експлуатації будівель, доріг та транспортних споруд**

До захисту  
Допускається  
Завідувач кафедри  
Будівництва та експлуатації  
будівель, доріг та транспортних споруд \_\_\_\_\_ О. П.  
Новицький

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**за другим рівнем вищої освіти**

На тему: «Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3D друку на прикладі загальноосвітньої школи в м. Охтирка»

Виконав (ла)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Д. С. Луцюк

\_\_\_\_\_ (Прізвище, ініціали)

Група

Буд 2301-2м

(Науковий)  
керівник

\_\_\_\_\_ (підпис)

Л. О. Богінська

\_\_\_\_\_ (Прізвище, ініціали)

Суми – 2024 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Кафедра:** Будівництва та експлуатації будівель, доріг та транспортних споруд  
**Спеціальність:** 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

**ЗАВДАННЯ**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

**Луцюк Дмитро Сергійович**

**Тема роботи:** Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3D друку на прикладі загальноосвітньої школи в м. Охтирка

Затверджено наказом по університету № 3455/ос від " 07 " 10 2024р.  
Строк здачі студентом закінченої роботи: " 1 " грудня 2024 р.

Вихідні дані до роботи:

Дані інженерно-геологічних вишукувань, типові проекти, завдання проектування \_\_\_\_\_

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

Розділ 1. Загальна характеристика роботи, 1.1. Створення стінових панелей, 1.2. Енергоефективність зовнішніх стінових панелей, Розділ 2. Опис

архітектурно-планувального рішення будівлі, 2.1. Ситуаційний план, 2.2. Об'ємно-планувальне рішення, 2.3. Архітектурно-конструктивне рішення,  
Список використаних джерел

---

---

---

---

---

5. Перелік графічного та або мультимедійного матеріалу (з вказівкою обов'язкових креслень)

18 слайдів мультимедійного матеріалу

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Керівник :**

(підпис)

Л. О. Богінська  
(Прізвище, ініціали)

**Консультант**

(підпис)

Л. О. Богінська  
(Прізвище, ініціали)

**Завдання прийняв до виконання:**

**Здобувач**

(підпис)

Д. С. Луцюк  
(Прізвище, ініціали)

## Анотація

**Луцюк Дмитро Сергійович** «Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3D друку на прикладі загальноосвітньої школи в м. Охтирка» – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2024.

Робота складається із змісту, загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, огляду досліджень за обраною темою, розділів основної частини, висновків за результатами МКР (українською та англійською мовами).

Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, методи наукового дослідження.

Дослідження присвячено впровадженню технології 3D-друку стінових панелей у будівництві загальноосвітніх шкіл, спрямованому на підвищення ефективності, економічності та стійкості будівельних процесів. Розглянуто технічні, економічні та екологічні аспекти технології, включаючи зменшення витрат, матеріальних відходів і часу будівництва порівняно з традиційними методами. Особлива увага приділена можливостям індивідуалізованого дизайну для покращення навчального середовища.

Методологія дослідження включає аналіз літератури, вивчення тематичних кейсів, моделювання та проведення технічних експериментів із прототипами стінових панелей, а також економічний і нормативний аналіз. Вивчено структурну цілісність, теплові та акустичні властивості матеріалів, вплив технології на довкілля, а також відповідність чинним будівельним нормам.

Наукова новизна полягає в системному аналізі можливостей 3D-друку в будівництві шкільних об'єктів, зокрема його впливу на скорочення витрат і відходів, а також у розгляді ролі технології як навчального інструменту, що сприяє розвитку технічної культури в освітньому середовищі.

Ключові слова: панелі, 3D друк, стіни.

Список публікацій та/або виступів на конференціях студента:

1. Богінська Л. О. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D ДРУКУ/ Д. С. Луцюк // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції , 29 листопада 2024 р., ХНАДУ, Харків, С. 24

2. Луцюк Д. С. Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3D друку на прикладі загальноосвітньої школи в м. Охтирка / Матеріали 86 Міжнародної наукової конференції студентів, 8-12 квітня 2024 р., ХНАДУ, Харків, С.49

В додатках наведено тези конференції, альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи.

Робота складається з основного тексту на 44 сторінках, у тому числі 8 таблиць, 5 рисунків. Текст роботи містить загальну характеристику роботи, 2 розділи, висновки і рекомендації за результатами роботи, список з 16 використаних джерел. Графічна частина складається з 18 слайдів мультимедійної презентації.

## **Abstracts**

Lutsyuk Dmytro Serhiyovych “Feasibility study of the implementation of 3D printing technology on the example of a secondary school in the city of Okhtyrka” – Master's qualification work in the form of a manuscript.

Master's qualification work in the specialty 192 “Construction and Civil Engineering”. – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2024.

The work consists of the content, general characteristics of the work and its qualification features, a review of research on the selected topic, sections of the main part, conclusions based on the results of the MCR (in Ukrainian and English).

The goal, objectives, object and subject of the study, methods of scientific research are formulated.

The study is devoted to the implementation of 3D printing technology of wall panels in the construction of secondary schools, aimed at increasing the efficiency, cost-effectiveness and sustainability of construction processes. Technical, economic and environmental aspects of the technology are considered, including reducing costs, material waste and construction time compared to traditional methods. Special attention is paid to the possibilities of individualized design for improving the learning environment.

The research methodology includes a literature review, thematic case studies, modeling and conducting technical experiments with prototypes of wall panels, as well as economic and regulatory analysis. The structural integrity, thermal and acoustic properties of materials, the impact of the technology on the environment, as well as compliance with current building codes were studied.

The scientific novelty lies in the systematic analysis of the possibilities of 3D printing in the construction of school facilities, in particular its impact on reducing costs and waste, as well as in considering the role of technology as an educational tool that contributes to the development of technical culture in the educational environment.

Keywords: panels, 3D printing, walls.

List of publications and/or speeches at student conferences:

1. Boginska L. O. FEASIBILITY AND ECONOMIC SUBSTITUTION OF THE IMPLEMENTATION OF 3D PRINTING TECHNOLOGY/ D. S. Lutsyuk // Materials of the XVIII International Scientific and Practical Conference, November 29, 2024, KhNADU, Kharkiv, p. 24

2. Lutsyuk D. S. Feasibility and economic justification of the implementation of 3D printing technology using the example of a secondary school in the city of Okhtyrka / Materials of the 86th International Scientific Conference of Students, April 8-12, 2024, KhNADU, Kharkiv, p. 49

The appendices contain conference abstracts, an album of multimedia presentation slides.

Structure of the work.

The work consists of the main text on 44 pages, including 8 tables, 5 figures. The text of the work contains a general description of the work, 2 sections, conclusions and recommendations based on the results of the work, a list of 16 sources used. The graphic part consists of 18 slides of a multimedia presentation.

## **ЗМІСТ**

<b>Розділ 1. Загальна характеристика роботи.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1. Створення стінових панелей.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2. Енергоефективність зовнішніх стінових панелей .....</b>	<b>23</b>
<b>Розділ 2. Опис архітектурно-планувального рішення будівлі.....</b>	<b>35</b>
<b>2.1. Ситуаційний план.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2. Об'ємно-планувальне рішення.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3. Архітектурно-конструктивне рішення.....</b>	<b>36</b>
<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>43</b>

## РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми:** Актуальність впровадження технології друку 3D стінових панелей у контексті школи полягає в її потенціалі революціонізувати як процес будівництва, так і середовище навчання. Інтегруючи цю передову технологію, школи можуть отримати переваги від швидких термінів будівництва, економічно ефективних методів будівництва та індивідуальних проектних рішень, адаптованих до конкретних потреб навчального закладу.

По-перше, 3D-друк забезпечує значну ефективність у будівництві, що має вирішальне значення для проектів громадської інфраструктури, таких як школи, де бюджетні обмеження та стислі графіки часто є проблемою. Технологія зменшує матеріальні відходи, точно використовуючи лише те, що необхідно, сприяючи як екологічній стійкості, так і економії коштів. Для школи це означає швидше завершення проекту, можливість раннього доступу до нових або відремонтованих приміщень, скорочення часу простою та мінімізацію збоїв у навчальному календарі.

По-друге, 3D-друковані стінові панелі пропонують можливість індивідуального дизайну, який може покращити освітнє середовище. Наприклад, панелі можуть бути надруковані з текстурами або візерунками, які покращують акустику в класах, створюють естетично привабливі простори, які стимулюють навчання учнів, або включають практичні функції, як-от інтегровані рішення для зберігання, усе адаптоване до конкретних потреб школи.

Крім того, використання 3D-друку настінних панелей узгоджується з сучасними освітніми пріоритетами. Сама технологія може служити освітнім інструментом, надихаючи студентів, демонструючи інноваційні інженерні та архітектурні методи безпосередньо в їхньому середовищі.

**Мета і завдання дослідження:** Мета дослідження полягає в дослідженні та оцінці впровадження технології друку 3D стінових панелей у

будівництві загальноосвітньої школи з акцентом на підвищення ефективності, стійкості та гнучкості дизайну. Дослідження має на меті визначити, як цей інноваційний підхід може задовольнити конкретні потреби в шкільній інфраструктурі, наприклад, скоротити витрати, прискорити терміни будівництва та покращити навчальне середовище завдяки використанню дизайну, що налаштовується.

Дослідження передбачає кілька ключових завдань. По-перше, аналізується технічна можливість застосування технології 3D-друку для виробництва стінових панелей для школи. Це включає міркування щодо структурної цілісності, вибору матеріалу та адаптованості технології до існуючих будівельних стандартів. Іншим завданням є оцінка економічного впливу, зосереджена на порівнянні вартості 3D-друкованих панелей із традиційними методами будівництва та оцінці довгострокової економії та оптимізації бюджету для проектів державних шкіл. Крім того, у дослідженні розглядаються екологічні переваги технології 3D-друку, зокрема щодо зменшення матеріальних відходів, зниження споживання енергії та мінімізації загального вуглецевого сліду будівництва, узгоджуючи його з сучасними цілями сталого розвитку.

Окрім цих практичних аспектів, дослідження також розглядає естетичні та функціональні переваги 3D-друкованих стінових панелей, такі як їхня універсальність дизайну, акустичні властивості та потенціал інтеграції додаткових функцій, які можуть покращити освітнє середовище. Крім того, він досліджує освітню цінність впровадження технології 3D-друку в шкільне середовище не лише як метод будівництва, але й як інструмент навчання для учнів у таких сферах, як інженерія, дизайн і технології.

**Об'єкт дослідження:** Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3D друку.

**Предмет дослідження:** Загальноосвітня школа в місті Охтирка.

**Методи дослідження:** Дослідження використовуватиме комбінацію якісних і кількісних методів, щоб забезпечити ретельний аналіз

впровадження технології друку 3D стінових панелей у будівництві школи. Спочатку буде проведено комплексний огляд літератури, щоб зібрати наявні знання про технології 3D-друку, зокрема їх застосування в будівельній галузі. Цей огляд забезпечить теоретичну основу для розуміння можливостей, обмежень і потенційних переваг використання 3D-друкованих стінових панелей у шкільній інфраструктурі.

Паралельно будуть проаналізовані тематичні дослідження існуючих проектів, де 3D-друк був успішно реалізований у будівництві, щоб зробити порівняння та отримати висновки, застосовні до шкільного середовища. Ці тематичні дослідження допоможуть визначити ключові фактори, такі як продуктивність матеріалів, ефективність витрат і терміни проекту, які можна порівняти з традиційними методами будівництва.

Щоб підтвердити висновки з літератури та тематичних досліджень, будуть проведені технічні експерименти та моделювання. Це включатиме створення прототипів 3D-друкованих стінових панелей з використанням різних матеріалів і дизайнів, що дозволить оцінити структурну цілісність, довговічність, а також теплові та акустичні властивості. Експерименти також вимірюватимуть вплив процесу 3D-друку на навколишнє середовище, зосереджуючись на використанні матеріалів, споживанні енергії та утворенні відходів.

Економічний аналіз стане ще одним ключовим методом, який передбачатиме порівняння витрат на використання стінових панелей, надрукованих на 3D, і звичайних будівельних технологій. Цей аналіз враховуватиме як початкові витрати на будівництво, так і довгострокові фінансові наслідки, такі як технічне обслуговування, енергоефективність і термін служби.

**Наукова та технічна новизна одержаних результатів:** Наукова новизна роботи полягає у всебічному аналізі можливостей використання технології 3D-друку стінових панелей для будівництва шкільних будівель, включаючи оцінку її технічних, економічних і екологічних переваг. У роботі

вперше досліджено вплив 3D-друку на зменшення матеріальних витрат, термінів будівництва та відходів, порівняно з традиційними методами. Розглянуто естетичні, акустичні та функціональні характеристики стінових панелей, адаптованих до потреб шкіл.

**Апробація та публікація результатів роботи:** 1. Богінська Л. О. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D ДРУКУ/ Д. С. Луцюк // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції , 29 листопада 2024 р., ХНАДУ, Харків, С. 24

2. Луцюк Д. С. Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3D друку на прикладі загальноосвітньої школи в м. Охтирка / Матеріали 86 Міжнародної наукової конференції студентів, 8-12 квітня 2024 р., ХНАДУ, Харків, С.49

### **1.1. Створення стінових панелей**

Глобальна будівельна індустрія зараз переживає глибокі зміни, зумовлені значною мірою появою технології 3D-друку. Менш ніж за десятиліття з моменту появи першого будівельного 3D-принтера стало очевидно, що об'ємний друк може спровокувати фундаментальні зміни в практиці будівництва. Очікується, що ця зміна призведе до значного підвищення ефективності, економічності та стійкості галузі.

За своєю суттю, 3D-друк відноситься до процесу виготовлення твердих тривимірних об'єктів практично будь-якої форми на основі цифрової комп'ютерної моделі. Цей процес, відомий як адитивне виробництво, передбачає послідовне нанесення матеріалу шарами, що відповідають контурам цифрової моделі об'єкта. На відміну від традиційного субтрактивного виробництва, при якому матеріал видаляється з більшого блоку, 3D-друк використовує лише необхідну кількість матеріалу, що робить його ресурсоефективним і адаптованим до складних геометрій.

Зараз існує приблизно 17 різних технологій 3D-друку, кожна з яких використовує різні матеріали, від полімерів до металів, а тепер і будівельних

матеріалів, таких як суміші на основі цементу. Серед найпоширеніших методів — моделювання плавненого осадження, також відоме як виготовлення плавлених ниток, яке є основою для технології багатьох будівельних 3D-принтерів. Перший варіант працює шляхом екструдуювання матеріалу шар за шаром, створюючи об'єкт із цифрового дизайну. У будівництві використовуються різноманітні суміші, такі як цементно-піщані суміші, каолін, гіпс та інші композиційні матеріали. Ці суміші часто містять спеціальні добавки для оптимізації таких характеристик, як міцність, пластичність і час затвердіння, які є критичними для забезпечення структурної цілісності та довговічності друківаних елементів.

Конструкція більшості будівельних 3D-принтерів, незалежно від винахідника чи виробника, дотримується загальної концептуальної основи. Однією з найпоширеніших конфігурацій є портална система козлового крану. У цій системі головка принтера, яка видавлює будівельний матеріал, рухається вздовж набору рейок, забезпечуючи рухливість у поздовжньому напрямку вісь  $Ox$ . Поперечна портална балка, оснащена електричними підйомниками, дозволяє друкуючій голівці рухатися перпендикулярно вздовж осі  $Oy$ , а вертикальне регулювання вісь  $Oz$  сприяє точному розміщенню шарів матеріалу.

Подача будівельної суміші до друкувальної головки здійснюється за допомогою героторного насоса, який використовує бетонний трубопровід, з'єднаний з гвинтовим насосом, що працює від електродвигуна і компресора. Ця система забезпечує постійний і контрольований потік матеріалу до друкувальної голівки. Весь процес контролюється персональним комп'ютером, на якому працює спеціалізоване числове програмне забезпечення, яке перетворює цифрову модель на послідовність команд, які принтер виконує.

Процедурні кроки для виконання проекту за допомогою будівельного 3D-принтера тісно пов'язані з етапами традиційних принтерів. Процес починається з фази цифрового моделювання, де створюється 3D

комп'ютерна модель об'єкта, в даному випадку стінової панелі. Програмне забезпечення автоматизованого проектування, таке як Autodesk AutoCAD, SketchUp або Revit, використовується для розробки необхідного цифрового представлення структури. Потім CAD-модель експортується у формат, який містить усі геометричні дані, необхідні для наступних етапів друку.



**Рис. 1.1. Блок-схема алгоритму друку типової стінової панелі**

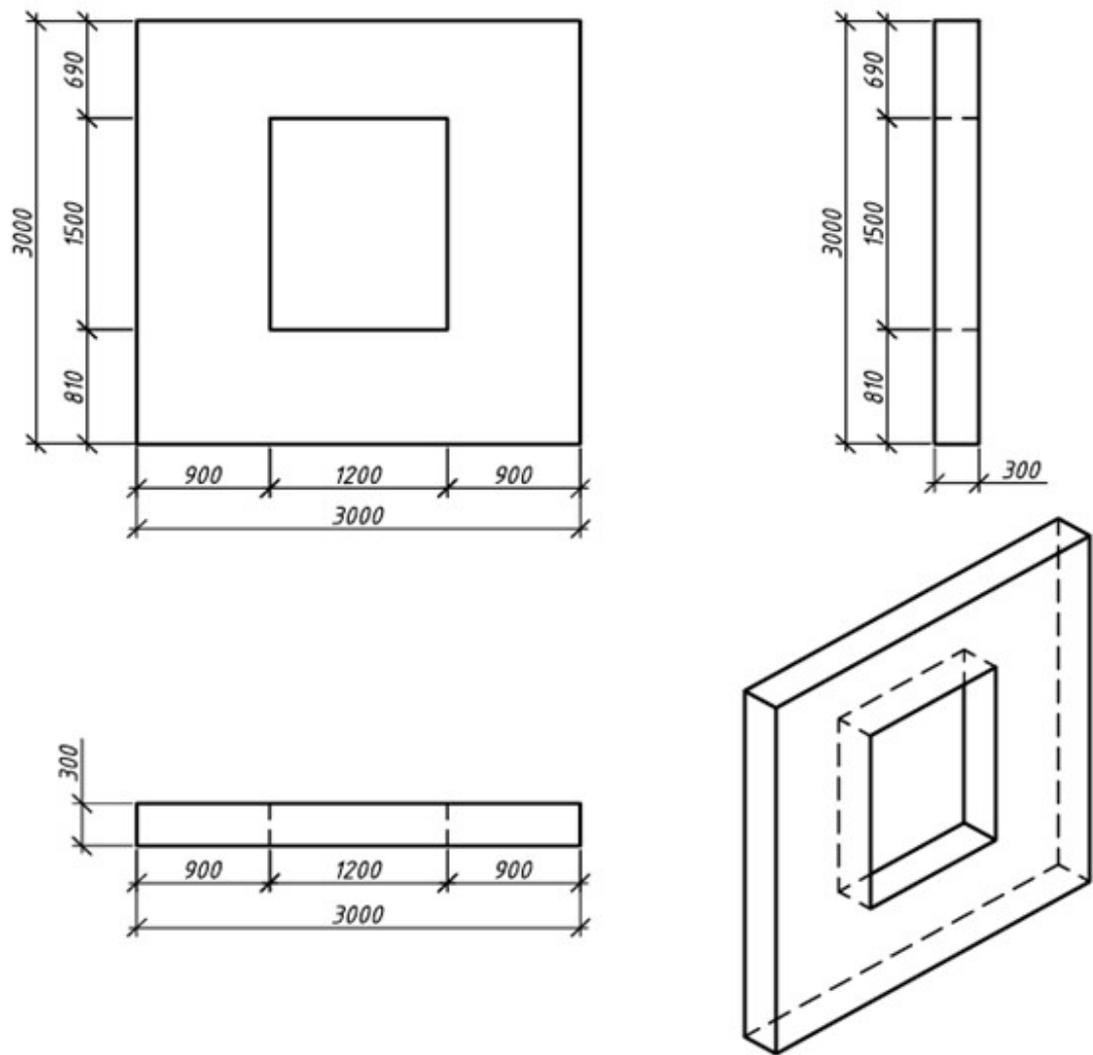
На початковому етапі дослідження була розроблена детальна тривимірна 3D цифрова модель стандартної стінової панелі за допомогою Autodesk AutoCAD, складного програмного забезпечення автоматизованого проектування, яке широко використовується в будівництві та машинобудуванні завдяки своїй точності, і універсальність в архітектурному моделюванні. Створення цієї цифрової моделі вимагало прискіпливої уваги до геометричних і структурних характеристик панелі, щоб переконатися, що вона відповідає специфікаціям дизайну, необхідним для технології 3D-друку. Autodesk AutoCAD було обрано через його здатність генерувати високодеталізовані та точні моделі, які є важливими для наступних етапів цифрового виробництва.

Процес розпочався з визначення точних розмірів, форми та внутрішніх характеристик стінової панелі, гарантуючи, що ці характеристики були оптимізовані як для структурної цілісності панелі, так і для можливостей 3D-

принтера. Модель включала важливі елементи, такі як деталі посилення, оздоблення поверхні та засоби для комунікацій, усі з яких були інтегровані в дизайн з урахуванням майбутнього процесу друку. Особливу увагу було приділено таким аспектам, як товщина панелі, розташування швів і загальний розподіл матеріалу, оскільки ці фактори безпосередньо впливають на механічні властивості та довговічність кінцевого друкованого продукту.

Цифрова модель була побудована як параметрична конструкція, що забезпечує гнучкість і коригування у разі модифікації структурних вимог або зміни складу матеріалу. Цей підхід також полегшив точний процес нанесення шарів, властивий адитивному виробництву, гарантуючи, що 3D-принтер зможе відтворити дизайн із високою точністю. Використовуючи надійні інструменти Autodesk AutoCAD для візуалізації та моделювання, модель можна було перевірити віртуально на предмет потенційних структурних проблем, таких як несуча здатність і теплове розширення, перш ніж перейти до фази фізичного друку.

Завершена модель стінової панелі, зображена на рисунку, представляє кульмінацію цього етапу процесу, готову для експорту у формат, сумісний із програмним забезпеченням для нарізки. Модель служить основним шаблоном, з якого можна ініціювати подальші процеси виготовлення, включаючи нарізку та 3D-друк, гарантуючи, що панель відповідає як дизайнерським, так і функціональним вимогам проекту. Цей етап розробки моделі є критично важливим, оскільки точність і повнота 3D цифрової моделі безпосередньо впливають на успіх наступних етапів друку та побудови.



**Рис 1.2. 3D-модель типової стінової панелі, створеної засобами AutoCAD**

Після успішного створення 3D-моделі стінової панелі наступним важливим кроком став експорт цифрового дизайну у формат файлу .dxf. Цей формат було обрано спеціально через його широку сумісність і здатність зберігати точну геометричну інформацію, необхідну для наступних етапів робочого процесу 3D-друку. Файл зберігає всі складні деталі оригінальної моделі Autodesk AutoCAD, гарантуючи, що жодна інформація про проект не буде втрачена під час процесу передачі. Цей крок є фундаментальним, оскільки він готує модель для перекладу у форму, яку може інтерпретувати 3D-принтер.

Після того, як модель було експортовано, вона пройшла подальшу обробку за допомогою програми слайсера, яка є спеціалізованим програмним

забезпеченням, призначеним для підготовки 3D-моделей до друку. Роль програми слайсера полягає в перетворенні безперервної 3D-геометрії стінової панелі в окремі шари, які можуть бути фізично створені на принтері в адитивний спосіб. Цей процес, відомий як нарізка, є ключовим, оскільки безпосередньо визначає, як принтер виконуватиме збірку, диктуючи як стратегію нанесення матеріалу, так і загальну якість друку.

Під час нарізки було ретельно визначено кілька ключових параметрів, щоб оптимізувати процес 3D-друку стінової панелі. Основними параметрами були товщина шару, яка контролює вертикальну роздільну здатність друку, і швидкість руху друкувальної голівки, яка впливає як на час друку, так і на точність розміщення матеріалу. Ці параметри були відкалібровані на основі властивостей матеріалу, таких як в'язкість і час схоплювання використовуваної суміші на основі цементу, а також механічних обмежень будівельного 3D-принтера. Правильне калібрування має вирішальне значення, оскільки будь-яке зміщення в цих налаштуваннях може призвести до структурних дефектів, нерівномірного шарування або втрати матеріалу.

Результатом процесу нарізки був файл G-коду, який служить набором машинних інструкцій, які керують роботою 3D-принтера. Це мова програмування низького рівня, яка використовується в системах комп'ютерного числового керування, і в цьому контексті він визначає кожну дію, яку має виконати принтер, щоб створити стінову панель. Ці дії включають точні рухи друкуючої голівки вздовж осей X, Y і Z, контроль швидкості екструзії матеріалу та налаштування для забезпечення оптимального з'єднання між шарами. Таким чином, файл G-коду представляє прямий переклад цифрової моделі в покрокову робочу схему для принтера.

Згенерований G-код був ретельно перевірений, щоб переконатися, що послідовності команд відповідають технічним вимогам проекту. Це включало перевірку фрагментів G-коду, які, по суті, є рядками інструкцій, які диктують рухи принтера та команди екструзії на кожному кроці процесу. У таблиці 1 представлені окремі фрагменти G-коду з виділенням ключових

команд, що стосуються пошарової конструкції стінової панелі. Ці команди включають такі параметри, як початкове позиціонування друкувальної головки, поступове переміщення вздовж кожної осі та швидкість екструзії матеріалу, усі з яких мають вирішальне значення для отримання точної та структурно надійної друкованої панелі.

Завдяки ретельному регулюванню цих параметрів і перевірці результату G-коду було закладено основу для успішного виконання процесу 3D-друку. Цей рівень ретельної підготовки гарантує, що кінцева надрукована стінова панель точно відповідатиме цифровій моделі з відповідним балансом міцності матеріалу, точності розмірів і якості поверхні. Уся процедура є прикладом критичної важливості точного цифрового перекладу у фізичний у сфері будівельного 3D-друку, де навіть незначні розбіжності в G-кодi можуть мати значні наслідки для загальної структурної роботи.

**Таблиця 1.1. Фрагмент G-коду для 3D-друку типової стінової панелі**

Формування нижнього шару стінової панелі	Формування першого шару стінової панелі на рівні віконного проїому	Формування заключного шару стінової панелі
N5 (File Name = стінова панель on Saturday, March 16, 2016)	N135 G0 Z825.0000	N2415 G0 Z3000.0000
N10 (Default Post)	N140 Z825.0000	N2420 Z3000.0000
N15 G91.1	N145 G1 Z825.0000 F60.00	N2425 G1 Z3000.0000 F60.00
N20 G0 Z15.0000	N150 Y300.0000	N2430 Y300.0000
N25 M3	N155 X900.0000	N2435 X3000.0000
N30 X0.0000 Y0.0000	N160 Y0.0000	N2440 Y0.0000
N35 Z15.0000	N165 G0 X2100.0000	N2445 X0.0000
N40 G1 Z15.0000 F60.00	N170 X2100.0000	
N45 Y300.0000	N175 G1 X2100.0000 F60.00	
N50 X3000.0000	N180 X3000.0000	
N55 Y0.0000	N185 Y300.0000	
N60 X0.0000	N190 X2100.0000	
	N200 Y0.0000	
	N205 G0 X900.0000	
	N210 X900.0000	
	N215 G1 X900.0000 F60.00	
	N220 X0.0000	

У цьому розділі програми керування процесом G-код описує точні дії, необхідні будівельному 3D-принтеру для виконання друку стінової панелі. Ці команди гарантують, що принтер дотримується попередньо визначеного шляху, шар за шаром, щоб створити структуру відповідно до цифрового дизайну.

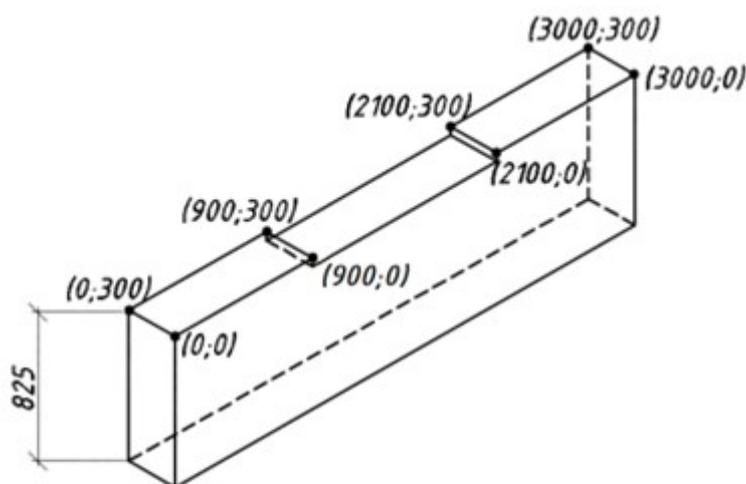
Процес починається з команди, яка встановлює рух у відносний режим, тобто кожен рух обчислюється на основі поточного положення друкувальної голівки, забезпечуючи точні переходи між кожною точкою. Потім команда швидкого позиціонування піднімає друкувальну голівку на 15 мм уздовж вертикальної осі, готуючи її до початку друку без екструдування будь-якого матеріалу під час руху. На цьому етапі друкуюча головка починає обертати екструзійний механізм у правильному напрямку, що дозволяє наносити матеріал у відповідні моменти.

Після цього налаштування принтер отримує вказівку рухатися з контрольованою постійною швидкістю, що забезпечує плавне й точне нанесення матеріалу. Перша частина G-коду визначає створення нижнього шару стінової панелі, де друкуюча головка рухається по прямокутній траєкторії, яка утворює зовнішній контур основи панелі. Цей шар служить основою для всіх наступних шарів, забезпечуючи необхідну міцність і стійкість конструкції.

Коли принтер рухається вгору, він досягає висоти, на якій знаходиться віконний отвір. Друкуюча голівка відповідно регулює своє положення та починає друкувати сегменти навколо вікна. Він відкладає матеріал для формування частини стінової панелі, залишаючи щілину для вікна. Потім принтер переходить до іншої області панелі, щоб продовжити друк, пропускаючи віконний отвір, зберігаючи при цьому точність загального контуру. Після завершення шляху навколо вікна принтер повертається, щоб заповнити інші розділи панелі, які не включають відкриття.

Ці ретельно контрольовані рухи дозволяють принтеру створювати складні геометрії, наприклад віконні отвори, зберігаючи при цьому

структурну цілісність стінової панелі. Кожен шар створено з точністю, що забезпечує відповідність надрукованої структури специфікаціям дизайну з плавними переходами між шарами та рівномірним розподілом матеріалу. Весь процес, від початкового базового шару до верхніх секцій з отворами, виконується ефективно за допомогою цієї добре скоординованої системи команд, що демонструє ефективність 3D-друку в сучасному будівництві.



**Рис. 1.3. Створення першого шару стінової панелі на рівні віконного проїому при  $z=825$  мм**

На останніх етапах побудови стінової панелі команди G-коду направляють 3D-принтер до завершення останнього шару. На цьому етапі процесу друкуюча головка переміщується до самого верхнього шару на висоті 3000 мм по вертикалі, позиціонує для створення остаточного контуру стінової панелі. Принтер ретельно прокреслює розміри панелі — 300 на 3000 мм — накладаючи завершальний шар матеріалу для завершення конструкції. Цей крок є ключовим, оскільки забезпечує структурну цілісність і обробку панелі, позначаючи завершення процесу друку для цього компонента.

Щоб успішно реалізувати будівництво типової стінової панелі за допомогою 3D-принтера, необхідно дотримуватися систематичного і точного алгоритму. Процес починається зі створення детальної 3D-моделі за

допомогою розширеного програмного забезпечення САПР, наприклад AutoCAD або Revit. Ця цифрова модель фіксує точні розміри, геометрію та структурні вимоги до стінової панелі, дозволяючи налаштувати на високому рівні та адаптувати до різноманітних потреб дизайну. Після створення моделі її потрібно експортувати у відповідний формат, який сумісний із програмним забезпеченням для нарізки та системами 3D-друку.

Наступний етап передбачає розрізання цифрової моделі, тобто процес її поділу на тонкі горизонтальні шари, які 3D-принтер може інтерпретувати та відтворювати фізично. Під час цього кроку створюється список команд, відомий як G-код. Цей G-код містить точні інструкції для принтера, диктуючи рухи, товщину шару, швидкість і параметри екструзії. Це гарантує, що принтер дотримується точного шляху, необхідного для створення панелі відповідно до цифрової моделі, зберігаючи точність розмірів і відповідність матеріалу.

Після генерації G-коду файл необхідно завантажити на головний керуючий комп'ютер 3D-принтера. Ця система, оснащена спеціальним програмним забезпеченням, взаємодіє з апаратним забезпеченням принтера для виконання команд G-коду. Потім принтер починає процес адитивного виробництва, де матеріал — часто цементні або полімерні суміші — наноситься шар за шаром для створення стінової панелі з нуля. Кожен шар ретельно наноситься, слідуючи траєкторії, заданій G-кодом, доки вся структура не буде завершена.

Після завершення процесу друку стінова панель може потребувати додаткової обробки залежно від застосування та вимог до обробки поверхні. Це може включати згладжування шорстких країв, видалення зайвого матеріалу або додавання спеціальної обробки для покращення довговічності, зовнішнього вигляду чи характеристик роботи. Дотримуючись цієї структурованої методології, процес 3D-друку дозволяє ефективно та точно виготовляти будівельні елементи, такі як стінові панелі, пропонуючи трансформаційний підхід до сучасного будівництва.

Таким чином, проведене дослідження завершилося розробкою та детальним описом системного алгоритму створення типових стінових панелей із використанням технології тривимірного друку в галузі будівництва. Цей процес було продемонстровано на прикладі конкретного конкретного прикладу, в якому висвітлено операційну структуру та технічні специфікації. Дослідження визначило та окреслило технологію 3D-друку, яка використовується будівельними 3D-принтерами, підкресливши її значення в сучасній практиці будівництва. Крім того, було сформульовано спільні архітектурні та інженерні принципи, що лежать в основі дизайну цих 3D-принтерів, що дало змогу зрозуміти їхні структурні та функціональні характеристики.

Дослідження також визначило програмні засоби, необхідні для полегшення різних етапів 3D-друку в будівництві, від цифрового моделювання до виконання самого друку. Це включає програмне забезпечення CAD для проектування моделей, програмне забезпечення для нарізки для створення G-коду та системи керування для керування процесом друку.

Інтеграція технології 3D-друку в будівельну галузь дає кілька помітних переваг перед традиційними методами. По-перше, це значно скорочує час, необхідний для завершення будівельних проектів, часто в кілька разів порівняно зі звичайними методами. Таке прискорення термінів будівництва дозволяє швидше розгортати будівлі та інфраструктуру, швидше вирішуючи нагальні потреби.

По-друге, впровадження технології 3D-друку призводить до значної економії коштів. Ефективність і точність адитивного виробництва зменшують відходи матеріалів і потреби в робочій силі, скорочуючи загальні витрати на будівництво більш ніж наполовину. Ця економічна вигода додатково доповнюється зменшенням потреби в ручній праці, оскільки технологія підвищує ступінь механізації виробничого процесу.

Крім того, 3D-друк відкриває нові можливості для архітектурного проектування, дозволяючи створювати надзвичайно інноваційні та естетично привабливі конструкції, які можуть бути складними або неможливими для традиційних методів будівництва. Цей розширений творчий потенціал поєднується зі здатністю технології використовувати більш широкий спектр будівельних матеріалів, включаючи індивідуальні та оптимізовані суміші, адаптовані до конкретних структурних або естетичних вимог.

Загалом, впровадження технології 3D-друку в будівельний сектор є значним прогресом, пропонуючи покращення в ефективності, економічній ефективності та гнучкості дизайну. Дослідження підкреслює трансформаційний потенціал цієї технології та її роль у формуванні майбутнього будівельної практики.

### **1.2. Енергоефективність зовнішніх стінових панелей**

Щоб спроектувати енергоефективні зовнішні стіни для будівництва за допомогою 3D-принтера, необхідно спочатку визначити вимоги до теплотехнічних показників, визначені українськими будівельними нормами. Ці правила визначають мінімальні значення теплового опору, необхідні для зовнішніх стін для забезпечення ефективної ізоляції та енергоефективності.

В Україні ці вимоги відрізняються залежно від температурних зон. Для більш холодних регіонів, класифікованих як Температурна зона I, мінімальний необхідний термічний опір стінових конструкцій становить 3,5 квадратних метра Кельвіна на ват. Натомість для більш м'яких регіонів, зокрема південних областей і Закарпаття, вимога становить 3 квадратних метрів Кельвіна на ват.

Щоб порівняти теплоефективність запропонованих конструкцій стін, надрукованих на 3D-принтері, із звичайними типами стін, для оцінки було вибрано кілька стандартних варіантів конструкції стін. Ці варіанти, показані на вказаному малюнку, представляють типові конструкції зовнішніх стін, які використовуються в традиційному будівництві.

Порівняння передбачає розрахунок термічного опору цих варіантів стін. Термічний опір вимірює здатність стіни протистояти тепловому потоку та розраховується шляхом ділення товщини матеріалу стіни на його теплопровідність. Цей розрахунок забезпечує чітке визначення того, наскільки добре ізолює кожен тип стіни.

Оцінюючи ці фактори, ми можемо визначити, наскільки надруковані на 3D-принтері конструкції стін відповідають встановленим стандартам і традиційним методам. Цей аналіз допомагає зрозуміти потенційні переваги чи недоліки використання технології 3D-друку з точки зору енергоефективності порівняно зі звичайними методами будівництва.

$$R_{\Sigma\text{пр}} \geq R_{q\text{ min}}$$

де  $R_{\Sigma\text{пр}}$  - приведений опір теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;

$R_{q\text{ min}}$  - мінімально допустиме значення опору теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Опір теплопередачі термічно однорідної непрозорої огорожувальної конструкції оцінюється шляхом розрахунку її здатності протистояти тепловому потоку, що є вирішальним для визначення її теплоізоляційної ефективності. Цей розрахунок передбачає вимірювання товщини стіни або огорожувальної конструкції і визначення теплопровідності використовованого матеріалу.

Товщина стіни представляє відстань, яку тепло має пройти через матеріал, і вона відіграє значну роль в ефективності ізоляції конструкції. Теплопровідність, з іншого боку, є властивістю матеріалу, яка вказує на те, наскільки легко тепло може проходити через нього; матеріали з нижчими значеннями теплопровідності забезпечують кращу ізоляцію.

Щоб визначити опір теплопередачі, товщину стінки ділять на теплопровідність матеріалу. Цей розрахунок забезпечує кількісну міру опору

стіни тепловому потоку, яка є важливою для оцінки загальної енергоефективності будівлі.

За допомогою цього методу можна порівняти ізоляційні характеристики різних матеріалів і конструкцій, дозволяючи приймати обґрунтовані рішення про те, які матеріали забезпечуватимуть найкращі теплові характеристики. Цей підхід гарантує, що огорожувальні конструкції будівлі ефективно зменшують втрати або надходження тепла, сприяючи створенню більш енергоефективного та комфортного середовища будівлі.

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_e} + \sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\alpha_s} = \frac{1}{\alpha_e} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{ip}} + \frac{1}{\alpha_s},$$

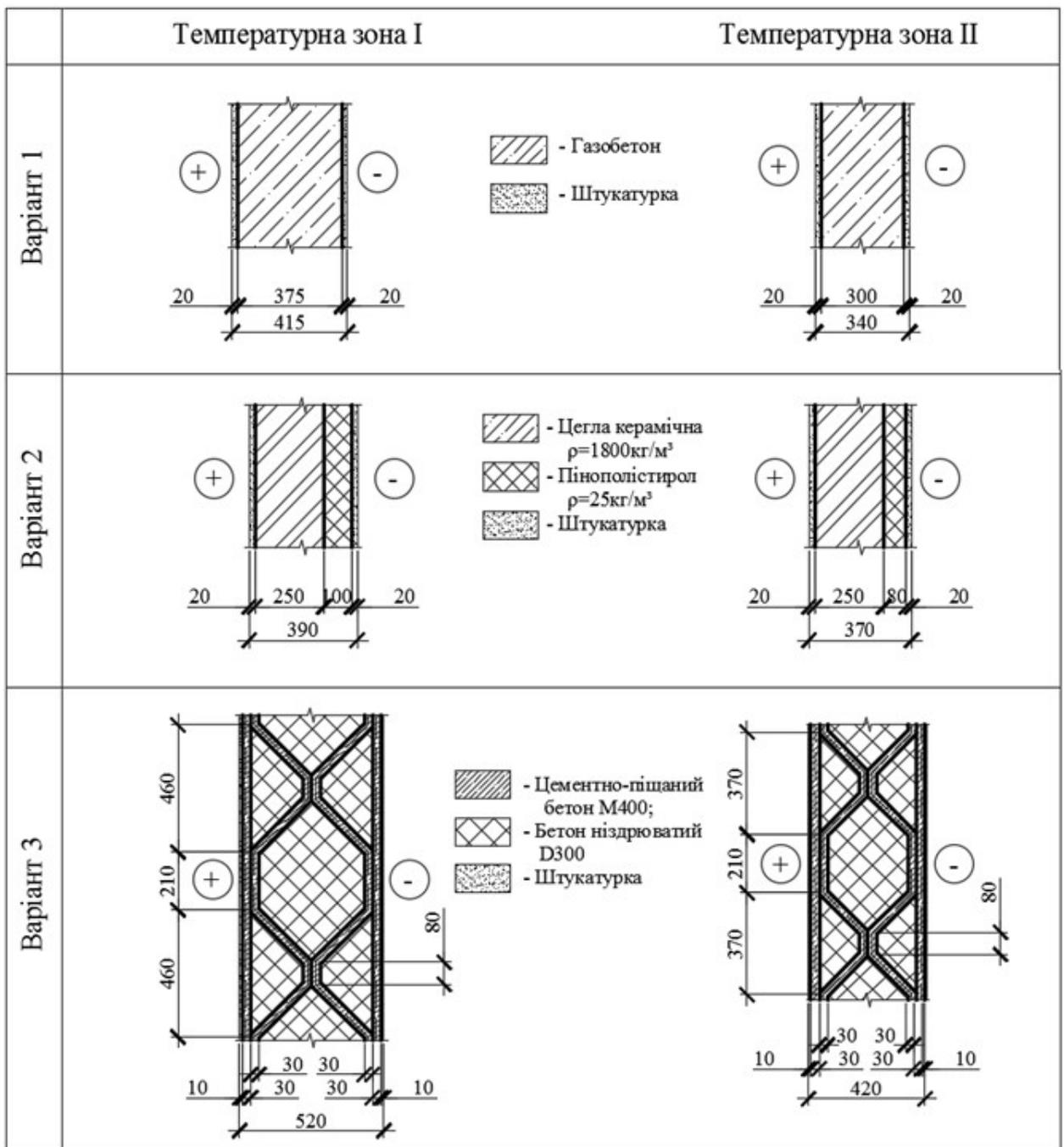
де  $\alpha_v = 8,7$ ,  $\alpha_z = 23$  - коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхонь огорожувальної конструкції, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda_{ip}$  - теплопровідність матеріалу і-го шару конструкції в розрахункових умовах експлуатації, Вт/(м·К);

$R_i$  - термічний опір і-го шару конструкції, м<sup>2</sup>·К/Вт, що розраховується за формулою:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_{ip}},$$

де  $\delta_i$  - товщина і-го шару конструкції, м.



**Рис. 1.4. Варіанти конструктиву зовнішніх стін для температурних зон I і II**

**Таблиця 1.2.Результати теплотехнічного розрахунку варіантів зовнішніх стін залежно від температурної зони**

№ п/п	Конструктив стіни	Температурна зона	$\delta_i$ , м	$\lambda_{ip}$ , Вт/(м*К)	$R_i$ , м <sup>2</sup> *К/Вт	$R_{\Sigma np}$ , м <sup>2</sup> *К/Вт
<b>Варіант 1</b>						
1	Внутрішня гіпсова штукатурка	I, II	0.02	0.7	0.029	<b>Зона I: 3,96</b>
2	Газобетон D400 B2,5	I	0.375	0.1	3.75	
		II	0.3		3.0	<b>Зона II: 3,21</b>
3	Фасадна цементно-піщана штукатурка	I, II	0.02	0.87	0.023	
	$\Sigma$	I	<b>0.415</b>			
		II	<b>0.34</b>			
<b>Варіант 2</b>						
1	Внутрішня гіпсова штукатурка	I, II	0.02	0.7	0.029	<b>Зона I: 3,46</b>
2	Цегла керамічна $\rho=1800\text{кг/м}^3$ на ЦПР	I, II	0.25	0.81	0.309	
3	Пінополістирол $\rho=25\text{ кг/м}^3$	I	0.1	0.034	2.941	<b>Зона II: 2,872</b>
		II	0.08		2.353	
4	Фасадна цементно-піщана штукатурка	I, II	0.02	0.87	0.023	
	$\Sigma$	I	<b>0.39</b>			
		II	<b>0.37</b>			
<b>Варіант 3 (для 3D-принтера)</b>						
1	Внутрішня гіпсова штукатурка	I, II	0.01	0.7	0.014	<b>Зона I: 3,416</b>
2	Бетон ніздрюватий D300	I	0.26	0.09	2.889	
		II	0.24		2,444	
3	Цементно-піщаний бетон M400 для 3D-принтера	I	0.22	0.7	0.343	<b>Зона II: 2,9</b>
		II	0.19		0,271	
4	Фасадна цементно-піщана штукатурка	I, II	0.01	0.87	0.011	

	$\Sigma$	I	0.52			
		II	0.43			

Аналіз результатів розрахунків показує, що опір теплопередачі запропонованих конструкцій зовнішніх стін значно перевищує мінімально допустимі значення, встановлені будівельними нормами. Зокрема, для температурної зони I, яка охоплює більш холодні регіони, необхідний мінімальний опір теплопередачі становить 3,5 квадратних метра Кельвіна на ват. Для Температурної зони II, яка включає більш м'які регіони, мінімальна вимога становить 3 квадратних метрів Кельвіна на ват. Запропоновані конструкції стін продемонстрували більш високий опір теплопередачі, ніж ці обумовлені порогові значення, гарантуючи, що вони відповідають або перевищують нормативні стандарти щодо теплоізоляції.

У подальшому було проведено комплексну техніко-економічну оцінку економічної ефективності будівництва запропонованих варіантів зовнішніх стін одноповерхового будинку. Ця будівля з розмірами 10 на 10 метрів і висотою поверху 3 метри служить основою для аналізу. Оцінка передбачала розрахунок загального обсягу матеріалів, необхідних для кожного варіанту конструкції, з урахуванням конкретної температурної зони, в якій буде розташована будівля. Результати цього аналізу, включно з порівняльними обсягами будівельних матеріалів і відповідними витратами для кожного варіанту проекту, детально описані в супровідній таблиці.

Ця техніко-економічна оцінка забезпечує критичне порівняння різних методів будівництва стін, підкреслюючи не тільки їх теплові характеристики, але й економічну доцільність. Інтегруючи ці фактори, оцінка дає цінну інформацію про найбільш рентабельні та енергоефективні рішення для будівництва зовнішніх стін.

**Таблиця 1.3. Об'єм зовнішніх стін відповідно до конструктиву та кліматичних умов**

Варіант стіни	Одиниці виміру	Об'єм стін залежно від температурної зони	
		I	II
Стіна із газобетону D400 B2,5	м <sup>3</sup>	43,3	34,9
Стіна із цегли керамічної $\rho=1800\text{кг/м}^3$ , утеплена пінополістиролом $\rho=25\text{ кг/м}^3$		40,5	38,3
Стіна із цементно-піщаного бетону M400 із заповненням камер ніздрюватим бетоном D300, виготовлена на 3D-принтері		57	47

Оцінка трудомісткості та норм витрат матеріалів для різних методів будівництва проводилась на основі стандартних кодів робіт та інформації від виробника будівельного 3D-принтера. Аналіз охоплював такі способи, як кладка стін з легкобетонних блоків, яка регулюється спеціальними нормами для конструкцій з висотою поверху до 5 метрів. Сюди входить норма витрати ресурсу на кубічний метр кладки. Інший проаналізований спосіб передбачав будівництво зовнішніх цегляних стін з теплоізоляцією, де використовуються теплоізоляційні плити загальною товщиною 380 міліметрів. Цей метод також дає стандартні показники витрати ресурсів на кубічний метр кладки. Крім того, в дослідженні розглядалося використання будівельного 3D-принтера для зведення стін з нормами споживання ресурсів на основі технічних рекомендацій виробника принтера.

Згідно з рекомендаціями виробника, для ефективної роботи будівельного 3D-принтера потрібна команда з двох інженерів. Ці інженери відповідають за нагляд за роботою принтера та виконання допоміжних завдань, таких як розміщення арматурних стрижнів і заповнення порожнин у стінах теплозберігаючим бетоном. Для цілей порівняння було припущено, що для еквівалентних завдань з використанням традиційних методів будівництва знадобляться два будівельники.

Результати цих розрахунків детально наведені в таблиці. Для оцінки вартості будівництва рекомендований рівень середньомісячної заробітної плати становить 9400 українських гривень, що відображає середню складність будівельних робіт, оцінену як 9,8. Витрати на матеріали були визначені на основі місцевих цін. Сюди входить вартість води 15,44 грн/куб, цементно-вапняного розчину М25 вартістю 1650 грн/куб і цегли керамічної щільністю 3800 кг/куб вартістю 5,1 грн/цегла. Витрати на газобетон були вказані в розмірі 91,4 грн за одиницю для блоків 300 мм і 151,75 грн за одиницю для блоків 375 мм. Витрати на теплоізоляційні плити були включені, але не вказані в наданій інформації.

Цей комплексний аналіз пропонує детальне порівняння традиційних методів будівництва та технології 3D-друку, зосереджуючись на таких аспектах, як вимоги до робочої сили, споживання матеріалів та економічна ефективність.

**Таблиця 1.4. Показники трудоемкості та витрат ресурсів на зведення зовнішніх стін**

Показник витрат на			1м <sup>3</sup> кладки	На будів- лю		1м <sup>3</sup> кладки	На будівлю		100м <sup>2</sup> загальної площі будівлі		
Шифр ресурсу	Найменування ресурсу	Один. вим.	8-22-1	Темп. зона		8-20-5	Темп. зона		3D- друк	Темп. зона	
				I	II		I	II		I	II
1	Витрати праці будівельників	люд- год	5,88	255	203	11,25	456	431	115	115	94
2	Середній розряд робіт	-	3,1		3,2		3				
3	Витрати праці машиніста	маш- год	0,9	39	31,4	1,07	44	41	55	55	46
<i>Матеріали</i>											
142- 0010-2	Вода	м <sup>3</sup>	0,26	11,3	9,1	0,25	10,8	8,7	5,3	5,3	4,8
1425- 11687	Розчин цемент.- вапняний М25	м <sup>3</sup>	0,11	4,8	3,8	0,25	10,8	8,7			

По про- екту	Цегла керамічна повнотіла	тис. шт.				0,403	16,3	15,4			
По про- екту	Газоблок: 375мм 300мм	м <sup>3</sup>	0,92	39,9	32,1						
По про- екту	Плити теплоізо- ляційні	м <sup>2</sup>				2,71	110	104			
По про- екту	Цементно- піщаний бетон М400	м <sup>3</sup>							15,4	15,4	15,3
По про- екту	Бетон ніздрюва- тий D300	м <sup>3</sup>							41,6	41,6	31,5

Пінополістирол із щільністю 25 кг/м<sup>3</sup> був оцінений для його теплоізоляційних застосувань, вартість вказана на основі різної товщини. За шар утеплювача загальною товщиною 80 міліметрів вартість становить 362 українські гривні за квадратний метр. При збільшенні товщини до 100 міліметрів вартість зростає до 600 гривень за квадратний метр. Крім того, вартість цементно-піщаного бетону М400 встановлена на рівні 3040 гривень за кубічний метр, а газобетону 300 – 2750 гривень за кубічний метр.

Ці показники вартості детально описано в супровідній таблиці, яка об'єднує розрахункові дані.

**Таблиця 1.5. Вартість зведення варіантів зовнішніх стін**

Варіант стіни	Одиниці виміру	Вартість робіт по зведенню стін за- лежно від темпера- турної зони, тис. грн		Вартість матеріалу для зведенню стін залежно від температурної зони, тис. грн		Загальна вартість, тис. грн	
		I	II	I	II	I	II
Варіант 1	грн	5,5	4,4	49,1	43,67	54,61	48,07
Варіант 2		9,48	8,95	63,29	54,92	72,77	63,87
Варіант 3		2,96	2,59	47,22	39,54	50,17	42,12

На наступному етапі дослідження фокус був перенесений на оцінку тривалості будівництва зовнішніх стін за кожним запропонованим способом будівництва. Ця оцінка мала на меті кількісно визначити час, необхідний для

завершення будівництва стіни, на який впливає темп роботи, визначений будівельною бригадою.

Для розрахунку тривалості процесу будівництва використовувалася детальна формула. Ця формула враховує різні фактори, включаючи складність будівельного завдання, ефективність використаних методів будівництва та рівень продуктивності робочої сили. Розрахунок дає оцінку загального часу, необхідного для будівництва стіни, пропонуючи цінну інформацію про експлуатаційну ефективність кожного варіанту будівництва.

Застосовуючи цю формулу, дослідження ефективно кількісно визначило часові рамки для різних методів будівництва стін, тим самим сприяючи порівняльному аналізу їх відносної ефективності.

$$T_p = \frac{Q}{n \cdot N}$$

де Q - трудомісткість роботи, люд-днів;

N - кількість робітників у бригаді, чол.;

n - кількість змін на добу, змін/доба.

**Таблиця 1.6. Тривалість будівництва варіантів зовнішніх стін**

Варіант стіни	Трудомісткість роботи залежно від температурної зони, люд-днів		Кількість робітників у бригаді, чол.	Кількість змін на добу, змін/доба	Тривалість будівництва залежно від температурної зони, дів	
	I	II			I	II
Варіант 1	37	29	2	1	18,5	14,5
Варіант 2	63	59			31,5	29,5
Варіант 3	20	18			10	9

Аналіз вартості та термінів будівництва показує, що використання технології об'ємного друку для зведення зовнішніх стін є економічно вигідним у порівнянні з традиційними способами будівництва. Для будинку розміром 10x10 метрів і висотою 4 метри технологія об'ємного друку виявляється значно економічнішою за однакових умов будівництва та кліматичних умов.

Зокрема, використання будівельного 3D-принтера дозволяє знизити вартість зведення зовнішніх стін на 55% у першій температурній зоні та на 61% у другій температурній зоні порівняно з вартістю зведення зовнішніх цегляних стін, утеплених пінополістиролом звичайними методами. Крім того, вартість 3D-друку на 8% нижча в першій температурній зоні та на 24% нижча у другій температурній зоні порівняно з будівництвом зовнішніх стін із газоблоків, при цьому зберігаються порівнянні властивості опору теплопередачі.

Крім того, застосування технології 3D-друку значно скорочує терміни будівництва. Згідно з дослідженнями та представленими даними, використання технології 3D-друку скорочує тривалість будівництва стін у 1,84 рази порівняно зі стінами з газоблоку та в 3,35 рази порівняно з цегляними стінами, утепленими пінополістиролом. Це скорочення часу будівництва підкреслює ефективність і потенціал технології 3D-друку в сучасних будівельних практиках.

### **Висновок**

Підхід до будівництва зовнішніх стін, розроблений за допомогою технології будівельного 3D-друку, фактично є значним прогресом у проектуванні енергоефективних конструкцій. Цей метод 3D-друку дозволяє створити точну конфігурацію секцій стіни відповідно до конкретних кліматичних умов будівельного майданчика. Зосередженість на оптимізації товщини стін відповідно до факторів навколишнього середовища демонструє пряму залежність між обсягом будівництва, енергоефективністю та загальною економічною ефективністю.

Кількісний аналіз показує, що використання технології будівельного 3D-друку призводить до значного зниження витрат. Зокрема, середня вартість зведення зовнішніх стін за цією технологією приблизно на 58% нижча порівняно з традиційними методами з утепленням зовнішніх стін пінополістиролом з цегли. Крім того, це на 22% дешевше, ніж будівництво стін з газоблоків, при збереженні аналогічних теплотехнічних показників.

Окрім економії коштів, технологія 3D-друку значно скорочує тривалість будівництва. Час, необхідний для зведення стін за допомогою 3D-друку, скорочується в 1,84 рази в порівнянні зі стінами з газоблоку і в 3,35 рази в порівнянні з цегляними стінами, утепленими пінополістиролом. Це покращення ефективності будівництва підкреслює переваги 3D-друку в оптимізації процесів будівництва.

Застосування тривимірного друку в будівництві пропонує численні переваги, включаючи зниження витрат на оплату праці, пом'якшення людських помилок, прискорення термінів будівництва та підвищення точності та якості готового продукту завдяки точності процесів, керованих комп'ютером.

У майбутньому плануються подальші дослідження для оцінки несучої здатності надрукованих на 3D-принтері стінових конструкцій. Це включатиме вивчення варіантів армування та методів інтеграції арматури в структуру 3D-друку для забезпечення структурної цілісності та довговічності.

## РОЗДІЛ 2. ОПИС АРХІТЕКТУРНО-ПЛАНУВАЛЬНОГО РІШЕННЯ БУДІВЛІ

### 2.1. Ситуаційний план



**Рис. 2.1. Ситуаційний план**

Будівельний майданчик школи розташований в центрі міста Охтирка на вулиці Рапія.

### 2.2. Об'ємно-планувальне рішення

Будівля школи спроектована як каркасна конструкція на основі монолітної залізобетонної системи, що забезпечує довговічність і стійкість. Він складається з двох основних секцій, які з'єднані між собою центральним коридором, що забезпечує ефективне пересування між різними частинами будівлі. Будівля піднімається на висоту 10 метрів і розташовується на трьох поверхах, включаючи підвал для додаткового підсобного простору.

Висота підлоги коливається від 3 до 3,5 метрів, що забезпечує достатній вертикальний простір для класних кімнат та адміністративних приміщень. Що стосується розмірів, то будівля має розміри 59 метрів уздовж осей 1-13 і 30 метрів уздовж осей А-Ж, пропонуючи збалансовану площу, яка максимізує простір, зберігаючи структурну цілісність. Таке планування

забезпечує гнучкість у дизайні інтер'єру та використанні, що робить його добре придатним для освітніх цілей.

### **2.3. Архітектурно-конструктивне рішення**

#### **Фундаменти та основи**

Будівля спирається на стрічковий монолітний залізобетонний фундамент, що забезпечує міцну основу, здатну витримувати конструктивне навантаження. Фундамент має глибину 1,4 метра і ширину 1,2 метра, що забезпечує стабільність і рівномірний розподіл ваги. Ділянка характеризується піщаними та глинистими ґрунтами, які впливають як на конструкцію фундаменту, так і на його взаємодію з умовами навколишнього ґрунту.

Ґрунтові води розташовані на глибині 3 метри, фактор, який ретельно враховується при плануванні фундаменту, щоб запобігти проблемам, пов'язаним з водою, таким як просочування або ерозія. Глибина фундаменту оптимізована, щоб збалансувати структурні потреби та специфічні характеристики ґрунту місцевості, забезпечуючи тривалу довговічність та ефективність будівлі.

#### **Зовнішні, внутрішні стіни та перегородки**

Стіни школи побудовані з панелей товщиною 340 мм, виготовлених за допомогою передової технології 3D-друку, що забезпечує точність і ефективність використання матеріалів і часу будівництва. Цей сучасний підхід забезпечує міцні однорідні конструкції стін, зберігаючи при цьому гнучкість дизайну. Зовнішні стіни доповнені додатковим шаром теплоізоляції, що значно підвищує енергоефективність будівлі за рахунок покращення теплозбереження та зниження теплопровідності.

Зсередини перегородки мають легку та функціональну товщину від 100 до 150 мм. Ці перегородки ефективно розділяють простір, зберігаючи цілісність конструкції та оптимізуючи використання внутрішнього простору. Поєднання міцних зовнішніх стін і більш тонких внутрішніх перегородок забезпечує довговічність і адаптованість до освітніх функцій будівлі.

## **Покрівля**

Конструкція плоского даху, побудована на монолітній залізобетонній плиті товщиною 250 мм, включає в себе ретельну багатошарову систему, розроблену для довговічності, гідроізоляції та теплової ефективності. Початковий шар являє собою гідроізоляційну мембрану товщиною 3 мм із синтетичного каучуку. Ця мембрана забезпечує чудову стійкість до проникнення води, УФ-випромінювання та екстремальних температур, забезпечуючи довговічність та структурну цілісність даху.

Поверх мембрани встановлюється шар ізоляції з екструдованого пінополістиролу товщиною 120 мм. Пінопласт відомий своїм високим значенням теплозбереження, міцністю на стиск і стійкістю до водопоглинання, що робить його ідеальним вибором для підтримки теплової ефективності та захисту будівлі від втрати тепла.

Поверх ізоляції додається розділовий шар міцної геотекстильної тканини товщиною 7 мм. Цей шар служить для захисту утеплювача від механічних пошкоджень під час будівництва та подальших ремонтних робіт.

Разом ці шари створюють міцну, енергоефективну плоску покрівлю, яка витримує вплив навколишнього середовища, забезпечуючи при цьому довгострокову продуктивність і мінімальне обслуговування.

## **Вікна та двері**

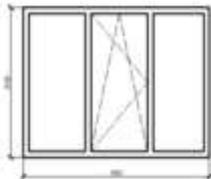
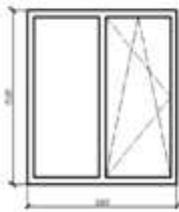
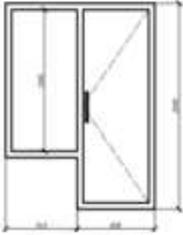
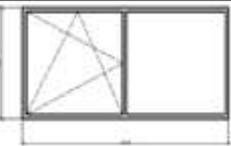
Вікна та двері шкільної будівлі спроектовані відповідно до функціональних та естетичних вимог, що сприяє загальній енергоефективності та безпеці будівлі.

На вікнах встановлені високоефективні склопакети. Кожне вікно складається з двох шарів скла, між якими проміжок заповнений аргоном для підвищення теплоізоляції. Зовнішній шар виготовлено зі скла з низьким коефіцієнтом випромінювання, яке відображає інфрачервоне випромінювання та мінімізує втрати тепла, тоді як внутрішній шар забезпечує покращену видимість і довговічність. Вікна розроблені з високим рейтингом повітронепроникності, щоб запобігти протягам і підвищити

енергоєфективність, і вони мають багатоточкову систему замикання для підвищення безпеки.

Двері виготовлені з армованого металу з ізольованим сердечником, що забезпечує як структурну цілісність, так і теплову ефективність. Зовнішні двері оснащені високоякісним атмосферостійким ущільнювачем, який запобігає проникненню повітря та води, забезпечуючи щільне прилягання до елементів. Міжкімнатні двері виготовляються з легких, міцних матеріалів, таких як композитна або пустотіла деревина, що забезпечує легкість у використанні та довговічність.

**Таблиця 2.1. Експлікація віконних отворів**

Мар., поз	Позначення	Найменування	Кількість на поверсі								Маса, од.,кг	Примітка
			Підв.	1	2	3	4	5	Гор.	Всього		
1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ВК1		ОРС19,8-15	-	4	4	4	4	4	-	20	-	
ВК2		ОРС13,8-15	-	7	7	7	7	7	-	35	-	
ВК3		ОРС13-19	6	-	-	-	-	-	-	6	-	
ВК4		ОРС18-23	-	6	6	6	6	6	-	30	-	
ВК5		ОРС6-9	-	1	1	1	1	1	-	5	-	
ВК6		О11-12В	-	2	2	2	2	2	-	10	-	

**Таблиця 2.2. Експлікація дверних отворів**

Мар, поз	Позначення	Найменування	Кількість на поведі								Мас аод., кг.	Примітка
			Підв	1	2	3	4	5	Гор.	Всього		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Т.У.2.6-11-97	Д.Б.700х2100	-	4	4	4	4	4	-	20		
2	Т.У.2.6-11-97	Д.Б.800х2100	-	2	2	2	2	2	-	8		
3	ГОСТ6629-88	ДО21-13	-	2	-	-	-	-	-	2		
4	Інд.вироб.	ДГ21-9	-	9	9	5	9	9	1	42		Дерев. Утепл.
5	ГОСТ6629-88	ДГ21-9	-	15	15	7	15	15	-	77		

### **Покриття підлог**

Класні кімнати та адміністративні приміщення: Підлога в класних кімнатах та адміністративних приміщеннях виконана з високоякісного пружного вінілового покриття. Цей матеріал обраний через його довговічність, стійкість до зношування та легкість чищення. Вінілова підлога розроблена таким чином, щоб витримувати інтенсивний рух людей і зберігати свій зовнішній вигляд з часом. Він має стійку до ковзання поверхню для підвищення безпеки та доступний у різноманітних кольорах і візерунках для створення приємного та захоплюючого навчального середовища. Підлога також містить амортизаційний шар, який забезпечує комфорт під ногами та зменшує шум, сприяючи більш тихій атмосфері в класі.

Наукові лабораторії та технічні кімнати: у спеціалізованих приміщеннях, таких як наукові лабораторії та технічні кімнати, підлогу оновлюють до хімічно стійкого епоксидного покриття. Цей тип підлоги має високу стійкість до розливів, плям і стирання, що робить його ідеальним для середовищ, де використовуються хімікати та важке обладнання. Епоксидне покриття є безшовним, що допомагає підтримувати гігієну та полегшує очищення, а також забезпечує високий рівень міцності проти ударів і механічних впливів.

Тренажерний зал і спортивні споруди: тренажерний зал і спортивні споруди обладнані спеціальною системою спортивних підлог, які виготовляються з інженерної деревини або міцної гуми. Спортивна підлога розроблена для поглинання ударів і ударів, забезпечуючи безпечну та зручну поверхню для фізичних навантажень. Він також має неслизьку поверхню, що запобігає травмам під час занять спортом і фізичних вправ. Конструкція включає розмітку та зони, характерні для різних видів спорту, наприклад, баскетбольних майданчиків або гімнастичних майданчиків.

Коридори та місця загального користування: підлогове покриття в коридорах та зонах загального користування поєднує в собі міцність та естетичну привабливість. У цих приміщеннях можна використовувати високоякісну керамічну плитку або полірований бетон. Керамічна плитка пропонує легкість в обслуговуванні та стійкість до інтенсивного руху людей, тоді як полірований бетон забезпечує сучасне рішення, яке не потребує обслуговування, має відмінну міцність і довговічність.

### **Зовнішнє і внутрішнє опорядження**

Будівля школи має продуманий дизайн інтер'єру та екстер'єру, створений для створення функціонального, гостинного та привабливого середовища для мешканців.

Усередині школи є класи, які організовані для підтримки різних методів навчання та групових заходів. Модульні ергономічні меблі дозволяють гнучко використовувати простір, а світлі нейтральні кольори стін посилюють природне освітлення та сприяють створенню яскравої, повітряної атмосфери. Дошки оголошень та інтерактивні дошки підтримують інтерактивне навчання, а пружна вінілова підлога забезпечує довговічність і легкість обслуговування. Акустичні панелі стратегічно розташовані для покращення якості звуку та зменшення шуму, сприяючи оптимальному навчальному середовищу.

Адміністративні зони всередині школи розроблені з урахуванням функціональності та професіоналізму. Меблі, включаючи столи, шафи для

документів і офісні стільці, розташовані так, щоб сприяти ефективному робочому процесу. Підлога в цих приміщеннях виготовлена з високоякісного вінілу або ламінату, що забезпечує професійний вигляд. Вбудоване сховище та стелажі інтегровані в дизайн, а загальна колірна гамма спокійна та професійна, підтримуючи цілеспрямоване робоче середовище.

Наукові лабораторії та технічні кімнати оснащені спеціалізованими меблями та світильниками, що відповідають потребам наукових експериментів і технічної роботи. Підлога вкрита епоксидним покриттям, щоб протистояти хімічним розливам і зносу, тоді як міцні робочі столи та мийки розроблені для практичності. Вбудовані засоби безпеки, такі як системи вентиляції та станції для промивання очей, що забезпечує безпечне робоче середовище.

Зони загального користування, такі як коридори, бібліотеки та вітальні, створені так, щоб бути затишними та комфортними. Підлога в цих приміщеннях складається з міцних матеріалів, таких як керамічна плитка або полірований бетон. Розташування меблів спрямоване на заохочення взаємодії та відпочинку, зокрема м'які сидіння та столи для спілкування та групової роботи. Відображаються барвисті твори мистецтва та студентські проекти, що додає особистий відтінок цим спільним просторам.

Зовнішній вигляд будівлі поєднує в собі сучасні матеріали та елементи дизайну для створення як візуальної привабливості, так і функціональності. Фасад має великі енергоефективні вікна з алюмінієвими рамами, які забезпечують достатню кількість природного світла та підвищують енергоефективність будівлі. Стіни облицьовані стійкими до погодних умов матеріалами, такими як композитні панелі або цегляна облицювання, що забезпечує захист і естетичну привабливість.

Головний вхід розроблено таким чином, щоб бути одночасно гостинним і безпечним, позначеним помітним навісом або виступом, який забезпечує захист від погодних умов. Посилені металеві або скляні двері

забезпечують безпеку, а такі функції доступу, як пандуси та автоматичні відкривачі, включені для розміщення всіх користувачів.

Навколишній ландшафт доповнює архітектуру будівлі з доглянутими зеленими насадженнями, мощеними доріжками та зонами для відпочинку на відкритому повітрі. Насадження кущів, дерев і квітів покращують візуальну привабливість і створюють тінь, а зовнішнє освітлення забезпечує безпеку та видимість у вечірній час. Плоский дах, покритий захисним гравійним баластом або синтетичною мембраною, розроблений таким чином, щоб протистояти погодним умовам і забезпечувати додаткову ізоляцію з системами, що монтуються на даху, інтегрованими в конструкцію.

Загалом інтер'єр та екстер'єр школи розроблено таким чином, щоб запропонувати безпечне, функціональне та привабливе середовище, що відображає сучасні архітектурні стандарти та практики сталого розвитку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1.7-2016 [Чинний від 2017-06-01]. -К: Держбуд України, 2017. – 84 с. (Національні стандарти України).
2. Благоустрій територій (зі Змінами): ДБН Б.2.2-5:2011 [Чинний від 2012-09-01]. -К: Мінрегіонбуд України, 2019. – 44 с. (Національні стандарти України).
3. Природне і штучне освітлення: ДБН В.2.5-28:2018 [Чинний від 2019-02-28]. -К: Мінрегіонбуд України, 2018. – 7 с. (Національні стандарти України).
4. Склад та зміст проектної документації на будівництво: ДБН А.2.2-3-2014 [Чинний від 2014-10-01]. -К: Мінрегіонбуд України, 2014. – 10 с. (Національні стандарти України).
5. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2016 [Чинний від 2016-10-01]. -К: Мінрегіонбуд України, 2017. – 15 с. (Національні стандарти України).
6. Навантаження і впливи. Норми проектування: ДБН В.1.2-2:2016 [Чинний від 2017-10-01]. -К: Мінрегіонбуд України, 2016. – 13-16 с. (Національні стандарти України).
7. Охорона праці і промислова безпека в будівництві ДБН А.3.2-2-2009: [Чинний від 2012-04-01]. -К: Мінрегіонбуд України, 2012. – 53-54 с. (Національні стандарти України).
8. Організація будівельного виробництва: ДБН А.3.1-5:2016 [Чинний від 2016-01-01]. -К: Мінрегіонбуд України, 2016. – 44-46 с. (Національні стандарти України).
9. Методичні вказівки для теплотехнічних розрахунків огорожуючих конструкцій з дисципліни “Будівельна теплофізика (для студентів факультету ПЦБ із спеціальності 7.092101), СНАУ, 2010.
10. Кошторисні норми України «Настанова з визначення вартості будівництва»: [Чинний від 2021-11-09]. -К: Мінрегіонбуд України, 2021. – 44-

46 с. (Національні стандарти України).

11. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6- 98:2009 [Чинний від 2011-01-01]. -К: Мінрегіонбуд України, 2011. – 45 с. (Національні стандарти України).

12. Методичні вказівки до виконання курсового проекту “Монтаж будівельних конструкцій”, Суми, СНАУ, 2008.

13. Довідково-інформаційний збірник ресурсів та одиничних розцінок на будівельно-монтажні роботи, Суми, СНАУ – 2011 р.

14. Нормування праці та кошториси в будівництві. Суми -«Мрія – 1», 2010 , 452 с.

15. Методичні вказівки до виконання курсового проекту “Монтаж будівельних конструкцій” Суми, СНАУ, 2008.

16. Організація будівельного виробництва (посібник для розробки курсових та дипломних проектів). Суми, СНАУ, 2011, 125 с.