

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра Архітектури та інженерних вишукувань**

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Архітектури та інженерних
вишукувань
_____ Бородай Д. С.

«___»_____2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

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

Виконав (ла)

Б. О. Хуторний

(підпис)

(Прізвище, ініціали)

Група

БУД 2401-1 м

(Науковий)
керівник

Д. С. Бородай

(підпис)

(Прізвище, ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: Архітектури та інженерних вишукувань
Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Хуторний Богдан Олександрович

Тема роботи: Техніко-економічне обґрунтування
впровадження технології 3-D на прикладі
загальноосвітньої школи I-III ст. в м. Охтирка

Затверджено наказом по університету № _____ від "___" ___ 2025р.
Строк здачі студентом закінченої роботи: "___" _____ 2025 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, Розділ 2. Бібліографічний огляд досліджень, Розділ 3. Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3D-друку, 3.1 Особливості використання технології, 3.2 Технічний аналіз використання технології, Розділ 4. Опис архітектурно-планувального рішення будівлі, 4.1. Ситуаційний план, 4.2. Об'ємно-планувальне рішення, 4.3. Архітектурно-конструктивне рішення, Список використаних джерел

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

15 слайдів мультимедійного матеріалу

Керівник :

(підпис)

Д. С. Бородай

(Прізвище, ініціали)

Консультант

(підпис)

Д. С. Бородай

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач

(підпис)

Б. О. Хуторний

(Прізвище, ініціали)

Анотація

Хуторний Богдан Олександрович «Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3-D на прикладі загальноосвітньої школи І-ІІІ ст. в м. Охтирка» – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

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.

Проведене дослідження присвячене застосуванню технології 3D-друку в будівництві навчальних закладів, зокрема одноповерхової школи. У дослідженні надано комплексну техніко-економічну оцінку технології, підкреслюючи її здатність трансформувати будівельний процес завдяки автоматизації, точності та ефективності використання матеріалів.

Інтеграція 3D-друку в будівельну галузь дозволяє вирішити ці завдання, забезпечуючи повністю автоматизоване виробництво конструкційних елементів, мінімізуючи людську працю та значно зменшуючи відходи матеріалів і викиди вуглецю. Технологія забезпечує швидке і точне формування стінових конструкцій з тепловим опором, що відповідає сучасним стандартам ефективності, де значення U коливаються в діапазоні від 0,25 до 0,35 Вт/м²·К.

Дослідження оцінює параметри 3D-принтерів будівельного масштабу, товщину шарів та швидкість нанесення матеріалу. Особлива увага приділяється вибору композитних будівельних сумішей з міцністю на стиск 25–45 МПа, що забезпечує як довговічність, так і структурну надійність надрукованих стін.

Дослідження також підкреслює екологічні та експлуатаційні переваги, включаючи зменшення будівельного шуму, мінімальні відходи на будівельному майданчику та можливість виробництва конструкційних елементів на місці. Ці фактори сприяють стійкості методу та його придатності для проектів, що вимагають швидкої реалізації та високих теплових характеристик, таких як освітні заклади в різних кліматичних зонах.

Ключові слова: стіни, 3D-друк, школа.

Список публікацій та/або виступів на конференціях студента:

1. Хуторний Б.О. Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3-D на прикладі загальноосвітньої школи I- III ст. в м. Охтирка // Матеріали 87-ї Міжнародної наукової конференції студентів університету, 7–11 квіт. 2025 р. Харків, 2025.

2. Хуторний Б.О. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ // Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції, 26 листопада 2025 р. Харків, 2025. С.24

В додатках наведено тези конференції, альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи.

Робота складається з основного тексту на 46 сторінках, у тому числі 5 таблиць, 7 рисунків. Текст роботи містить загальну характеристику роботи, 4 розділи, висновки і рекомендації за результатами роботи, список з 18 використаних джерел. Графічна частина складається з 15 слайдів мультимедійної презентації.

Abstracts

Khutornyy Bohdan “Technical and economic justification for the implementation of 3-D technology using the example of a general education school of I-III degrees in the city of Okhtyrka” – Master's thesis in manuscript form.

Master's thesis in the specialty 192 “Construction and Civil Engineering.” – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The thesis consists of a table of contents, a general description of the work and its qualifying characteristics, a review of research on the chosen topic, sections of the main part, and conclusions based on the results of the MCR (in Ukrainian and English).

The purpose, objectives, object, and subject of the research, as well as the methods of scientific research, are formulated.

The study is devoted to the application of 3D printing technology in the construction of educational institutions, in particular a single-story school. The study provides a comprehensive technical and economic assessment of the technology, emphasizing its ability to transform the construction process through automation, precision, and efficient use of materials.

The integration of 3D printing into the construction industry allows these tasks to be solved by ensuring fully automated production of structural elements, minimizing human labor, and significantly reducing material waste and carbon emissions. The technology enables the rapid and accurate formation of wall structures with thermal resistance that meets modern efficiency standards, where U-values range from 0.25 to 0.35 W/m²·K.

The study evaluates the parameters of construction-scale 3D printers, layer thickness, and material application speed. Particular attention is paid to the selection of composite building mixtures with a compressive strength of 25–45 MPa, which ensures both durability and structural reliability of printed walls.

The study also highlights environmental and operational benefits, including reduced construction noise, minimal waste on the construction site, and the ability to produce structural elements on site. These factors contribute to the sustainability

of the method and its suitability for projects that require rapid implementation and high thermal performance, such as educational facilities in different climatic zones.

Keywords: walls, 3D printing, school.

List of student publications and/or conference presentations:

1. Khutornyy B. Technical and economic justification for the implementation of 3D technology using the example of a general education school I-III in the city of Okhtyrka // Materials of the 87th International Scientific Conference of University Students, April 7–11, 2025. Kharkiv, 2025.

2. Khutornyy B. TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION FOR THE IMPLEMENTATION OF 3D PRINTING TECHNOLOGY // Materials of the XIX International Scientific and Practical Conference, November 26, 2025. Kharkiv, 2025. P. 24.

The appendices contain the conference abstracts and a slide album of the multimedia presentation.

Structure of the work.

The work consists of the main text on 46 pages, including 5 tables and 7 figures. The text of the work contains a general description of the work, 4 sections, conclusions and recommendations based on the results of the work, and a list of 18 sources used. The graphic part consists of 15 slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

Розділ 1. Загальна характеристика роботи.....	9
Розділ 2. Бібліографічний огляд досліджень.....	12
Розділ 3. Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3D-друку.....	18
3.1 Особливості використання технології.....	18
3.2 Технічний аналіз використання технології.....	23
Розділ 4. Опис архітектурно-планувального рішення будівлі.....	35
4.1 Ситуаційний план.....	35
4.2 Об'ємно-планувальне рішення.....	35
4.3 Архітектурно-конструктивне рішення.....	37
Список використаних джерел.....	45

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми: Будівельна галузь переживає фундаментальні зміни, спричинені попитом на більш швидкі, економічні та енергоефективні методи будівництва. Традиційні технології будівництва навчальних закладів залишаються трудомісткими та матеріалоемними, з втратами, що часто досягають 10–15 %, та значними викидами CO₂. Впровадження технології 3D-друку забезпечує автоматизоване виготовлення конструкційних елементів, точне нанесення матеріалу та оптимізацію геометрії стін. Такий підхід зменшує відходи матеріалів до менше ніж 2% і скорочує терміни будівництва до 50%, забезпечуючи при цьому відповідність стандартам енергоефективності, з коефіцієнтами теплопередачі для друкованих стін від 0,25 до 0,35 Вт/м²·К. Ці переваги роблять 3D-друк особливо актуальним для проектів будівництва шкіл, де критично важливими є швидке будівництво, зниження витрат і привабливий дизайн.

Мета і завдання дослідження: Основною метою дослідження є оцінка доцільності та ефективності технології 3D-друку в будівництві навчальних закладів. Дослідження зосереджується на оцінці технічних можливостей 3D-принтерів будівельного масштабу. Було проведено комплексний техніко-економічний аналіз з урахуванням трудових затрат, витрати матеріалів, вартості будівництва та тривалості проекту. Також було оцінено екологічний та соціальний вплив, включаючи зменшення енергії, відходів матеріалів та часу реалізації проекту.

Об'єкт дослідження: Загальноосвітня школа в місті Охтирка.

Предмет дослідження: Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3D друку.

Методи дослідження: У дослідженні було використано комбінацію цифрових, аналітичних та порівняльних методів. Цифрове моделювання за допомогою програмного забезпечення САД та програм для нарізки дозволило

створити точні 3D-моделі стін та траєкторії руху принтера. Було проведено аналіз теплових характеристик для розрахунку характеристик стін та оцінки ефективності ізоляції в різних кліматичних зонах. Техно-економічна оцінка включала стандартизовані робочі коди та дані виробників 3D-принтерів, що дозволило розрахувати продуктивність праці, витрату матеріалів та загальні витрати на будівництво. Порівняльний аналіз протиставив 3D-друк традиційним методам будівництва з цегли та газобетону з точки зору вартості, часу та ефективності використання ресурсів. Огляд наукової та технічної літератури допоміг визначити найкращі практики, властивості матеріалів та технологічні тенденції.

Наукова та технічна новизна одержаних результатів: Новизна цього дослідження полягає в комплексній оцінці технології 3D-друку для будівництва шкільних будівель, що поєднує технічні, теплові, економічні та соціальні аспекти. Оптимізовані конструкції стін забезпечують тепловий опір з коефіцієнтом 0,25–0,35 Вт/м²·К, гарантуючи як енергоефективність, так і надійність конструкції. Також продемонстровано екологічні переваги, включаючи мінімальні відходи матеріалів, нижчу витрачену енергію та прискорені терміни будівництва. Загалом, дослідження підтверджує, що 3D-друк у будівельному масштабі є технічно ефективним та економічно вигідним підходом до будівництва навчальних закладів, що сприяє його ширшому впровадженню в будівельному секторі.

Практичне значення одержаних результатів: Результати показують, що 3D-друк у будівництві значно знижує як вартість, так і тривалість будівництва зовнішніх стін у порівнянні з традиційними методами. Ця технологія забезпечує економію до 50–55% у порівнянні з цегляною кладкою та 10–15% у порівнянні з пористим бетоном, а час будівництва скорочується до одного дня замість декількох тижнів. Визначені параметри матеріалів та налаштування друку можуть бути безпосередньо застосовані в практичному проектуванні та плануванні будівельних проектів.

Апробація та публікація результатів роботи: 1. Хуторний Б.О. Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології 3-D на прикладі загальноосвітньої школи I- III ст. в м. Охтирка // Матеріали 87-ї Міжнародної наукової конференції студентів університету, 7–11 квіт. 2025 р. Харків, 2025.

2. Хуторний Б.О. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ // Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції, 26 листопада 2025 р. Харків, 2025. С.24.

РОЗДІЛ 2

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

Ідея застосування 3D-друку, у будівельному секторі набула значного поширення протягом останніх двох десятиліть, перетворившись з експериментальної технології на реальну альтернативу традиційним методам будівництва. Ранні дослідження на початку 2000-х років продемонстрували можливість використання автоматизованих екструзійних систем для нанесення будівельних матеріалів, таких як бетон, у структурні форми. Ця робота заклала основу для подальших досягнень, які поступово змінили сприйняття 3D-друку в будівництві з теоретичної цікавості на практичне рішення[18].

У всьому світі кілька проектів продемонстрували реальний потенціал цієї технології. У 2018 році в місті Табаско в Мексиці, було оголошено про створення першого житлового комплексу, побудованого за допомогою 3D-друку. Було побудовано 50 будинків, призначених для сімей з низьким рівнем доходу. Кожен будинок площею приблизно 46 квадратних метрів був побудований за 24 години друку. Проект не тільки продемонстрував швидкість будівництва, але й довів його економічну ефективність, оскільки ціна за одиницю була значно нижчою за середню вартість традиційного недорогого житла в регіоні. Аналогічно у 2020 році в Бельгії побудовано двоповерховий будинок площею 90 квадратних метрів, надрукований на 3D-принтері. Ця будівля залишається однією з найбільших надрукованих житлових споруд в Європі і служить основою для випробування енергоефективних житлових рішень.

Застосування 3D-друку в освітній галузі все ще є відносно обмеженим, проте вже з'являються перші новаторські приклади. У 2021 році було розроблено проект на Мадагаскарі, в результаті якого було побудовано першу в світі школу, надруковану на 3D-принтері. Будівля школи, спроектована як модульна конструкція, а друк основної конструкції зайняв менше тижня. Стіни були виготовлені з цементної суміші, що наносився шарами, а проект мав на меті вирішити гостру проблему нестачі освітньої інфраструктури у віддалених

регіонах. За даними ЮНЕСКО, до 2030 року для задоволення глобальних потреб в освіті буде потрібно приблизно 70 мільйонів нових вчителів, і ця цифра підкреслює нагальну потребу в швидких і масштабованих інфраструктурних рішеннях. Ця ініціатива продемонструвала, як 3D - будівництво може сприяти вирішенню цієї глобальної проблеми[13].



Рис. 2.1 Процес створення будівлі

З технологічної точки зору, матеріали, що використовуються в 3D-будівництві, значно еволюціонували. Якщо ранні прототипи в значній мірі покладалися на стандартні суміші на основі портландцементу, то сучасні розробки запровадили спеціалізовані композитні розчини та геополімерні бетони, які покращують як друкованість, так і структурні характеристики. Дослідження показують, що надруковані стіни можуть досягати міцності на стиск, порівнянної або вищої за міцність традиційної цегляної кладки, часто досягаючи значень в діапазоні 25–35 МПа. Більше того, автоматизація процесу друку значно зменшує відходи матеріалів: дослідження показують, що вони зменшуються на 60% порівняно з традиційними методами на основі опалубки.

Ці вдосконалення не тільки підвищують стійкість будівництва, але й сприяють зниженню загальних витрат.

Незважаючи на прогрес, залишається кілька викликів у масштабному впровадженні 3D-друку для шкіл та іншої громадської інфраструктури. Відсутність стандартизованих будівельних норм, адаптованих до даного будівництва, часто ускладнює отримання дозволів від регуляторних органів, обмежуючи швидкість, з якою можна масштабувати проекти. Крім того, високі початкові інвестиції, необхідні для промислових принтерів, які можуть становити від 500 000 до понад 2 мільйонів доларів США залежно від їхньої потужності та технології, створюють перешкоди для широкого впровадження в регіонах з низьким рівнем доходів. Проте, поточні дослідження та успіх пілотних проектів свідчать про те, що ці перешкоди поступово усуваються, що відкриває шлях для більш широкого впровадження в найближче десятиліття.

Технологічна основа 3D-друку в будівництві полягає у великомасштабних автоматизованих системах екструзії, які наносять шари матеріалу для формування структурних компонентів. На відміну від невеликих настільних принтерів, які використовують пластик, будівельні принтери використовують цементні суміші або геополімерні композити як основний матеріал. Ці машини є або порталними системами, які рухаються по фіксованих рейках і можуть друкувати конструкції в межах визначеного прямокутного каркаса, або системами на основі робототехнічних маніпуляторів, які забезпечують більшу гнучкість і мобільність на будівельних майданчиках. Портальні принтери можуть досягати розмірів до 12 метрів в ширину, 6 метрів у висоту і 50 метрів в довжину, що дозволяє виробляти повномасштабні будівлі, такі як односімейні будинки або модулі класів. Системи з робототехнічними маніпуляторами, хоча і менші за розміром, краще підходять для друку складних геометричних форм або збірних компонентів[18].

Одним з основних аспектів технології є склад матеріалу. Традиційний портландцемент сам по собі не є оптимальним для друку через його усадку,

повільне затвердіння та потенційну деформацію шарів. З цієї причини розробляються модифіковані розчини з добавками, такими як зола, кремнеземний дим та суперпластифікатори, які покращують текучість та зчеплення між шарами. Типові розчини для 3D-друку досягають міцності на стиск в діапазоні 25–40 МПа, що можна порівняти з конструкційним бетоном, який використовується в традиційних будівлях. Реологічний контроль є надзвичайно важливим: суміш повинна бути достатньо рідкою, щоб її можна було видавлювати через сопло, але при цьому достатньо жорсткою, щоб витримувати вагу наступних шарів без руйнування. Дослідження, проведені в Німеччині, показали, що оптимізовані розчини можуть зберігати стабільність форми до 30 хвилин після екструзії, що є достатнім для безперервного друку без опалубки.

Сам процес друку регулюється цифровим проектуванням і комп'ютерним виробництвом. Архітектурна модель будівлі перетворюється на багат шаровий цифровий файл, створений за допомогою програмного забезпечення для нарізання, яке розділяє геометрію на горизонтальні траєкторії. Ці траєкторії потім перетворюються на команди руху для принтера, забезпечуючи точне нанесення матеріалу. Товщина шару становить від 10 до 30 міліметрів, а діаметр сопла варіюється від 20 до 50 міліметрів залежно від необхідної швидкості та роздільної здатності. Великоформатні принтери можуть наносити матеріал зі швидкістю від 100 до 300 літрів на годину, що дозволяє виготовляти стіни висотою від 3 до 4 метрів менш ніж за 24 години.

Інтеграція армування залишається критичною технічною проблемою. Хоча стандартні бетонні конструкції в значній мірі покладаються на сталеве армування, вбудовування армування в друковані стіни є більш складним. Деякі рішення передбачають ручне вставлення сталевих стрижнів або сітки під час процесу друку, а інші використовують армовані розчини зі скловолокном, базальтом або поліпропіленовим волокном для підвищення міцності на розрив. Експериментальні дослідження показали, що міцність на розрив армованого

волокном друкованого бетону становить 4–6 МПа, що покращує стійкість до тріщин і довговічність. Також досліджуються гібридні підходи, де друковані оболонки поєднуються з традиційними армованими серцевинами, щоб відповідати стандартам структурної безпеки для багатоповерхових будівель.

З енергетичної точки зору, 3D-друк зменшує потребу в опалубці та транспортуванні матеріалів на будівельний майданчик, що становить значну частину енергоспоживання в традиційному будівництві. Порівняльне дослідження, проведене в Нідерландах, показало, що стіни, надруковані на 3D-принтері, споживають на 50–70% менше матеріалу в порівнянні з бетонними стінами, що мають еквівалентну несучу здатність. Крім того, автоматизований друк мінімізує витрати праці: тоді як для будівництва типового навчального корпусу традиційними методами може знадобитися 15–20 робітників на будівельному майданчику, для будівництва аналогічного корпусу, надрукованого на 3D-принтері, достатньо 3–4 кваліфікованих операторів, а також техніків, які контролюють роботу принтера та постачання матеріалів.

Якість та точність розмірів забезпечуються завдяки постійному моніторингу процесу друку. Сучасні принтери оснащені системами лазерного сканування та датчиками LIDAR для виявлення відхилень у товщині шару, вирівнюванні та швидкості осадження в режимі реального часу. Досягаються допуски ± 2 міліметри, що знаходиться в межах діапазону, необхідного для більшості будівельних компонентів. Термічне затвердіння та умови навколишнього середовища також відіграють важливу роль: оптимальний друк здійснюється при температурі навколишнього середовища від 10 °C до 30 °C, з контролем відносної вологості для запобігання передчасному висиханню та утворенню тріщин. У регіонах з жарким кліматом додають домішки для уповільнення часу затвердіння, а в холодніших умовах використовують нагрівальні елементи або ізольовані кожухи для підтримки необхідних умов затвердіння[18].

Іншим аспектом цієї технології є її придатність для модульного та збірного будівництва. Принтери можна встановлювати в контрольованих заводських умовах для виробництва стінових панелей, колон та елементів фасаду, які потім транспортуються та збираються на місці. Цей гібридний підхід поєднує точність цифрового виробництва зі швидкістю традиційних методів складання.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ

3.1 Особливість використання технології

Інтеграція технології 3D-друку в будівництво навчальних закладів обумовлена насамперед потребою в швидкості, економічній ефективності та гнучкості, але її успіх значною мірою залежить від технічних характеристик. Школи потребують міцних стін, належного теплового комфорту, звукоізоляції та здатності витримувати інтенсивне щоденне використання. Тому технічні характеристики як машин, так і матеріалів, що використовуються в 3D-друку, відіграють вирішальну роль.

Одним з найуспішніших прикладів є школа на Мадагаскарі. Для цього проекту використовувався принтер порталного типу, здатний покривати площу 8 на 8 метрів, з максимальною висотою 3 метри за один безперервний друк. Діаметр сопла становив 25 міліметрів, а швидкість нанесення досягала майже 150 літрів на годину, що дозволило надрукувати стіни стандартного модуля класу (близько 56 квадратних метрів корисної площі) менш ніж за 18 годин. Включаючи процеси затвердіння та обробки, загальний час будівництва конструктивної оболонки становив менше одного тижня — майже в чотири рази швидше, ніж за допомогою традиційних методів кладки[3].

Склад матеріалу є одним з найважливіших аспектів. Для подібних проектів друкований розчин поєднує портландцемент (40–60%), дрібні заповнювачі, такі як кварцовий пісок (30–50%), та контрольовану частку зольного пилу або шлаку (5–15%) для підвищення міцності. Суперпластифікатори додаються у пропорціях 0,5–1% від ваги цементу для забезпечення текучості, а прискорювачі затвердіння іноді використовуються для досягнення часу скріплення шарів менше 15 хвилин. Отриманий друкований матеріал досягає міцності на стиск від 28 МПа через 7 днів до 40–45 МПа через 28 днів. Щодо міцності на розрив, додавання поліпропіленових волокон (2–3 кг на кубічний метр суміші) підвищує опір до 4–5

МПа, покращуючи контроль тріщин під термічними або динамічними навантаженнями.

Теплові та акустичні характеристики є однаково важливими для класних кімнат. Друковані стіни товщиною 200–250 міліметрів, мають теплопровідність від 0,35 до 0,45 Вт/м·К, що забезпечує належний баланс між конструкційною міцністю та ізоляцією. Додаткові шари ізоляційного матеріалу, такі як мінеральна вата або поліуретанові панелі, можуть бути вбудовані в порожнини стін під час або після друку для досягнення значень нижче 0,25 Вт/м²·К, відповідно до сучасних стандартів енергоефективності для навчальних будівель. Акустичні випробування, проведені на подібних друкованих стінах в Європі, показали рівень звукоізоляції 45–50 дБ, що є достатнім для підтримки прийнятної акустики в класах.

Конструктивна безпека залишається важливим фактором для шкіл, які повинні вміщувати велику кількість дітей. Щоб вирішити проблему обмеженої міцності на розрив цементних матеріалів, під час друку часто застосовується армування. Наприклад, у двоповерховій друкованій будівлі в Бельгії сталева арматура була вручну розміщена в призначених порожнинах друкованих стін, що дозволило досягти несучої здатності понад 100 кН на лінійний метр довжини стіни. Для шкільних приміщень перевагу надають гібридним системам: принтер будує стіни та зовнішню оболонку, а залізобетон використовується для конструкційних балок, плит перекриття та фундаментів. Це гарантує відповідність будівель міжнародним стандартам сейсмічної та вітрової навантаженості.

Також було проведено широке дослідження довговічності друкованих матеріалів. Прискорені випробування на старіння показують, що 3D-друковані розчини мають стійкість до заморожування-розморозування, порівнянну з традиційним бетоном, витримуючи понад 200 циклів заморожування-розморозування без значних пошкоджень поверхні при використанні повітрявтягуючих добавок. Коефіцієнт водопоглинання залишається нижче 8%

за масою, що обмежує капілярну дію і зменшує ризик погіршення стану через вологу. Такі характеристики міцності є життєво важливими для шкільних будівель, які повинні залишатися функціональними протягом десятиліть з мінімальним технічним обслуговуванням[18].

Ще однією технічною перевагою цієї технології є можливість модульності. Класи можна друкувати у вигляді стандартизованих модулів площею 50–60 квадратних метрів кожен, з висотою стін 3 метри і прольотами до 6 метрів. Принтери, такі як COBOD BOD2, які на даний момент є одними з найпоширеніших в Європі, можуть досягати швидкості друку до 1 метра в секунду, що дозволяє побудувати стандартний каркас класу менш ніж за два дні. Повторюючи та з'єднуючи ці модулі, можна побудувати цілий шкільний комплекс з 10–12 класами за кілька тижнів.



Рис. 3.1 Принтер COBOD BOD2

Економічна доцільність використання 3D-друку в будівництві шкіл тісно пов'язана з його здатністю знижувати як прямі витрати на будівництво, так і

довгострокові експлуатаційні витрати. Традиційне будівництво шкіл в значній мірі покладається на ручну працю, великі обсяги опалубки та інші підготовчі процеси, що призводить до середніх витрат у розмірі 24 000–48 000 гривень за квадратний метр, залежно від регіону та цін на матеріали. На противагу цьому, пілотні проекти з використанням 3D-друку продемонстрували значне зниження витрат. Наприклад, проект в Мексиці повідомив про середні витрати на будівництво в розмірі 14 000–16 000 гривень за квадратний метр для житлових одиниць площею 46 м². Хоча це були житлові, а не освітні будівлі, принцип зменшення споживання матеріалів та трудових затрат однаково застосовується до шкіл.

Зниження використання матеріалів є одним з найважливіших факторів економії витрат. Оскільки друковані стіни є порожнистими або оптимізованими за допомогою внутрішніх решітчастих конструкцій, вони вимагають на 30–50 % менше бетону в порівнянні з традиційними монолітними стінами однакової міцності. Враховуючи, що цемент становить до 40% вартості сировини в бетонному будівництві, це скорочення перетворюється на відчутну фінансову вигоду. Крім того, мінімізація відходів — зазвичай менше 2% від загального обсягу порівняно з 10–15% відходів у традиційних методах — ще більше підвищує ефективність.

Витрати на робочу силу також істотно змінюються. Середній шкільний проект площею приблизно 1000 квадратних метрів вимагає 20–25 будівельників протягом 8–12 місяців. За допомогою 3D-друку кількість робітників на місці можна зменшити до 5–7 операторів і техніків, які в основному займаються наглядом за обладнанням, підготовкою матеріалів і контролем якості. Таке скорочення робочої сили не тільки знижує витрати, але й скорочує терміни будівництва. Наприклад, стандартний модуль класу площею 50–60 квадратних метрів можна надрукувати за 18–24 години, а всю школу з 10–12 класами можна побудувати за 6–8 тижнів, порівняно з 10–14 місяцями за допомогою традиційних методів.

Енергоефективність під час будівництва також сприяє економічній ефективності. Дослідження, проведені в Нідерландах і Данії, показують, що будівлі, надруковані на 3D-принтері, споживають на 30–60 % менше енергії, ніж традиційні споруди, завдяки відсутності необхідності у виробництві опалубки, зменшенню транспортування громіздких матеріалів та меншій залежності від важкої техніки. Це не тільки знижує прямі витрати на будівництво, але й сприяє досягненню довгострокових цілей у сфері сталого розвитку, що робить такі проекти придатними для міжнародного зеленого фінансування та державних стимулів у деяких країнах[3].

Витрати протягом життєвого циклу є не менш важливими для оцінки доцільності. Друковані будівлі з міцністю на стиск 30–45 МПа та армуванням на розтяг, інтегрованим за допомогою сталевих стрижнів або волоконних добавок, демонструють прогнозований термін експлуатації 50–70 років, що можна порівняти зі стандартними цегляними спорудами. Витрати на технічне обслуговування зменшуються завдяки точності процесу друку, що мінімізує будівельні дефекти, такі як тріщини або нерівні стики. Споживання енергії під час експлуатації також нижче завдяки оптимізованій геометрії стін, яка може включати ізоляційні шари, що дозволяє досягти до 25% зниження витрат на опалення та охолодження в порівнянні зі звичайними будівлями подібного розміру.

Початкові інвестиції в обладнання часто називають перешкодою: промислові принтери, такі як COBOD BOD2 або WASP Crane, коштують від 20 000 000 до 80 000 000 гривень, залежно від їх конфігурації та максимального обсягу будівництва. Однак, якщо амортизувати ці витрати на кілька проектів, вони стають економічно вигідними. Наприклад, один принтер COBOD BOD2 здатний виготовити 50–60 класних кімнат на рік, що знижує вартість обладнання на одиницю до менше ніж 400 000 гривень, якщо розподілити її на 5-річний цикл експлуатації[5].

З точки зору перспектив на майбутнє, економічний потенціал 3D-друку для шкіл виходить за межі безпосередньої економії на будівництві. Можливість виробництва модульних, стандартизованих класних блоків створює можливості для масового впровадження, особливо в регіонах з високим приростом населення або дефіцитом інфраструктури. За оцінками Світового банку, тільки в Африці на південь від Сахари до 2030 року потрібно побудувати понад 700 000 нових класів, щоб задовольнити демографічний попит. Якщо навіть 20% з них будуть побудовані за допомогою 3D-друку із середньою економією 8000 гривень на квадратний метр, сукупна фінансова вигода може перевищити 160 000 000 000 гривень.

3.2 Технічний аналіз використання технології

Сучасна будівельна галузь переживає значні перетворення, спричинені впровадженням технології 3D-друку. Цей інноваційний підхід обіцяє істотно прискорити будівельні процеси, одночасно підвищивши точність, ефективність використання матеріалів та гнучкість конструкцій. Наразі для застосування в будівництві досліджується понад двадцять різних технологій 3D-друку, кожна з яких адаптована до конкретних властивостей матеріалів та конструкційних вимог. До часто використовуваних матеріалів належать цементні композити, кераміка на основі каоліну, гіпсові суміші та геополімерні бетони з міцністю на стиск від 25 до 45 МПа залежно від складу та умов затвердіння. Точне налаштування реології матеріалу забезпечує оптимальний потік через екструзійну форсунку, зберігаючи стабільність шару, що є критично важливим для досягнення структурної цілісності в багатоповерхових спорудах[3].

Більшість 3D-принтерів будівельного масштабу використовують конфігурацію порталного типу, аналогічну порталному крану, що дозволяє рухатися вздовж трьох осей (X, Y, Z) з типовими обсягами друку 8–12 метрів завширшки, 6 метрів заввишки та 50 метрів завдовжки. Деякі системи з роботами-маніпуляторами пропонують додаткові ступені свободи обертання, що дозволяє друкувати складні геометрії та нелінійні конструкції. Робота цих

принтерів повністю цифрова: процес починається з детального 3D-моделювання запланованої конструкції в програмному забезпеченні для автоматизованого проектування. Потім цифрова модель розрізається на горизонтальні шари, створюючи траєкторії руху інструменту, які передаються на принтер через пряме з'єднання або мережевий інтерфейс.

Перед нанесенням матеріалу принтер проходить фазу ініціалізації, що включає калібрування порталу або роботизованої руки, перевірку параметрів екструзії та попередню обробку матеріалу для досягнення оптимальної в'язкості та гідратації. Після процесу друку можуть застосовуватися обробки для підвищення якості поверхні, поліпшення точності розмірів та збільшення стійкості до факторів навколишнього середовища. Ці обробки можуть включати механічну обробку, прискорювачі затвердіння або нанесення захисних покриттів, які в сукупності сприяють довговічності, естетичній якості та функціональній продуктивності надрукованих елементів конструкції.



Рис. 3.2 Алгоритм роботи 3D-прінтера

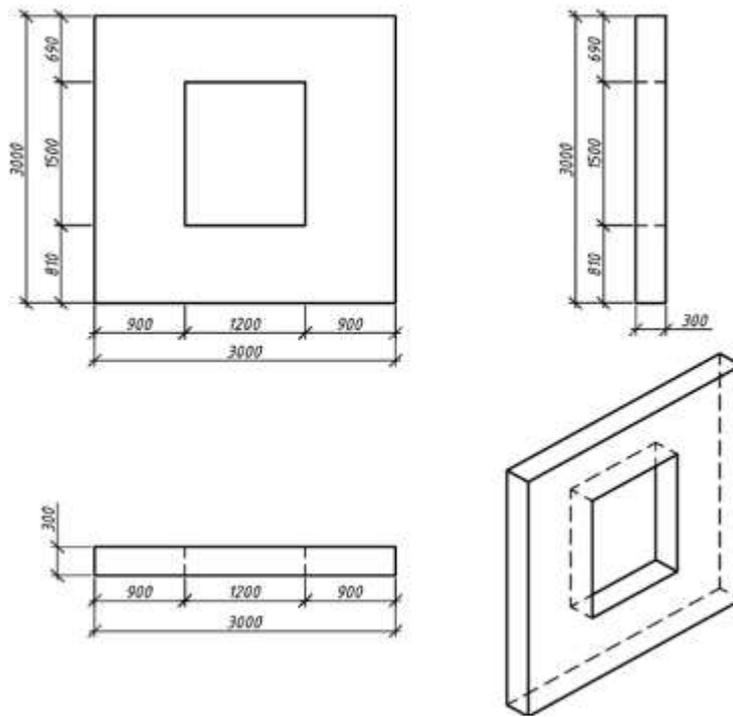


Рис. 3.3 Типова стінова панель

Після експорту 3D-моделі стінової панелі у відповідному форматі вона обробляється за допомогою програмного забезпечення для нарізання, щоб створити файл траєкторії інструменту, специфічний для принтера. Цей файл містить усі критичні параметри для процедури друку, включаючи товщину шару, швидкість нанесення, діаметр сопла та швидкість потоку матеріалу[3].

Крім того, файл траєкторії інструменту містить інструкції щодо прискорення, уповільнення та відведення сопла, що забезпечує точне розміщення шару та мінімізує дефекти, такі як провисання або відшарування шару. Ці параметри в сукупності забезпечують точне виготовлення стінової панелі, гарантуючи як точність розмірів, так і механічні характеристики відповідно до проектних специфікацій.

Таблиця 3.1 Фрагмент файлу траєкторії руху

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	

Наданий фрагмент визначає траєкторію для виготовлення двох елементів стінової панелі. Ця послідовність регулює нанесення базового шару, утворюючи контур розмірами 300 на 3000 міліметрів і висотою шару 15 міліметрів.

Фрагмент до віконного отвору:

N30 X0 Y0: Встановлення початкового положення сопла з координатами X=0 та Y=0.

N35 Z15: Підйом сопла на висоту 15 мм по осі Z.

N40 G1 Z15 F60: Початок лінійної інтерполяції для переміщення сопла вниз до тієї ж координати Z зі швидкістю 60 мм/с.

N45 Y300: Переміщення сопла по осі Y на 300 мм.

N50 X3000: Переміщення сопла по осі X на 3000 мм.

N55 Y0: повернення сопла по осі Y в початкову точку (0 мм).

N60 X0: повернення сопла по осі X в початкову точку (0 мм).

Фрагмент на рівні віконного отвору:

N135 Z825: встановлення Z-координати сопла на 825 мм, що відповідає рівню віконного отвору.

N140 Z825: підтримка координати Z сопла на рівні 825 мм.

N145 G1 Z825 F60: Запуск лінійної інтерполяції, щоб сопло залишалося на координаті Z 825 мм зі швидкістю 60 мм/с.

N150 Y300: Переміщення сопла по осі Y на 300 мм.

N155 X900: Переміщення сопла по осі X на 900 мм.

N160 Y0: повернення сопла по осі Y на 0 мм.

N165 G0 X2100: Швидке позиціонування сопла за координатою X на 2100 мм.

N170 X2100: Утримання координати X сопла на рівні 2100 мм.

N175 G1 X2100 F60: Запуск лінійної інтерполяції для утримання сопла на координаті X 2100 мм зі швидкістю 60 мм/с.

N180 X3000: Переміщення сопла по осі X на 3000 мм.

N185 Y300: Переміщення сопла по осі Y на 300 мм.

N190 X2100: Переміщення сопла по осі X назад на 2100 мм.

N200 Y0: повернення сопла по осі Y на 0 мм.

N205 G0 X900: Швидке позиціонування сопла за координатою X на 900 мм.

N210 X900: Утримання координати X сопла на рівні 900 мм.

N215 G1 X900 F60: Початок лінійної інтерполяції, щоб забезпечити утримання сопла на координаті X 900 мм зі швидкістю 60 мм/с.

N220 X0: повернення сопла по осі X до початкової точки (0 мм).

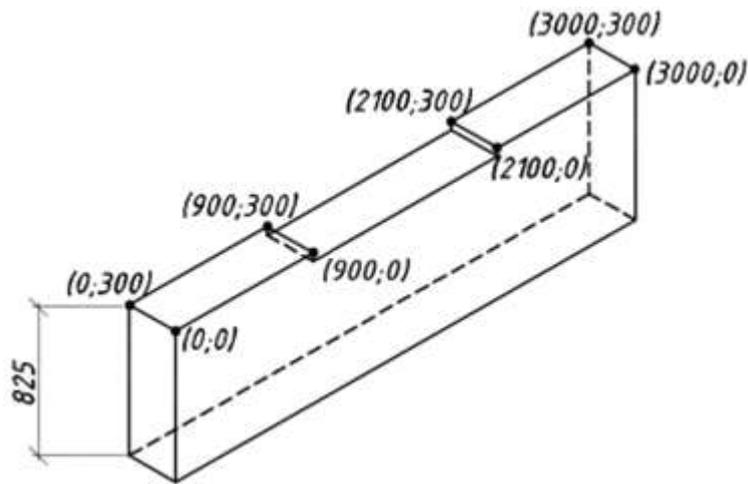


Рис. 3.4 Створення першого шару стінової панелі

Застосування 3D-друку у виробництві стінових панелей дозволяє оптимізувати енергоефективність та використання матеріалів у будівництві. Для виробництва теплоефективних панелей необхідний детальний термотехнічний аналіз. Він включає оцінку опору теплопередачі, визначення оптимальної товщини стінок та вибір конфігурацій, що забезпечують баланс між структурними вимогами та ізоляційними характеристиками. Добре спроектовані 3D-друковані панелі можуть досягти теплового опору, що відповідає значенням $0,25\text{--}0,35 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, що сприяє значному зниженню енергоспоживання будівель на опалення та охолодження[18].

Для визначення доцільності впровадження 3D-друку в будівельних проектах критично важливим є техніко-економічний аналіз. Порівняння вартості, ефективності використання матеріалів та довгострокових експлуатаційних характеристик 3D-друкованих панелей з традиційною цегляною кладкою або збірними альтернативами дозволяє визначити рішення, які пропонують як фінансові, так і екологічні переваги. Оптимізовані конструкції панелей зменшують споживання матеріалів, покращують енергоефективність та дозволяють інтегрувати багатофункціональні елементи, такі як ізоляційні шари або структурне армування, без істотного збільшення витрат на будівництво.

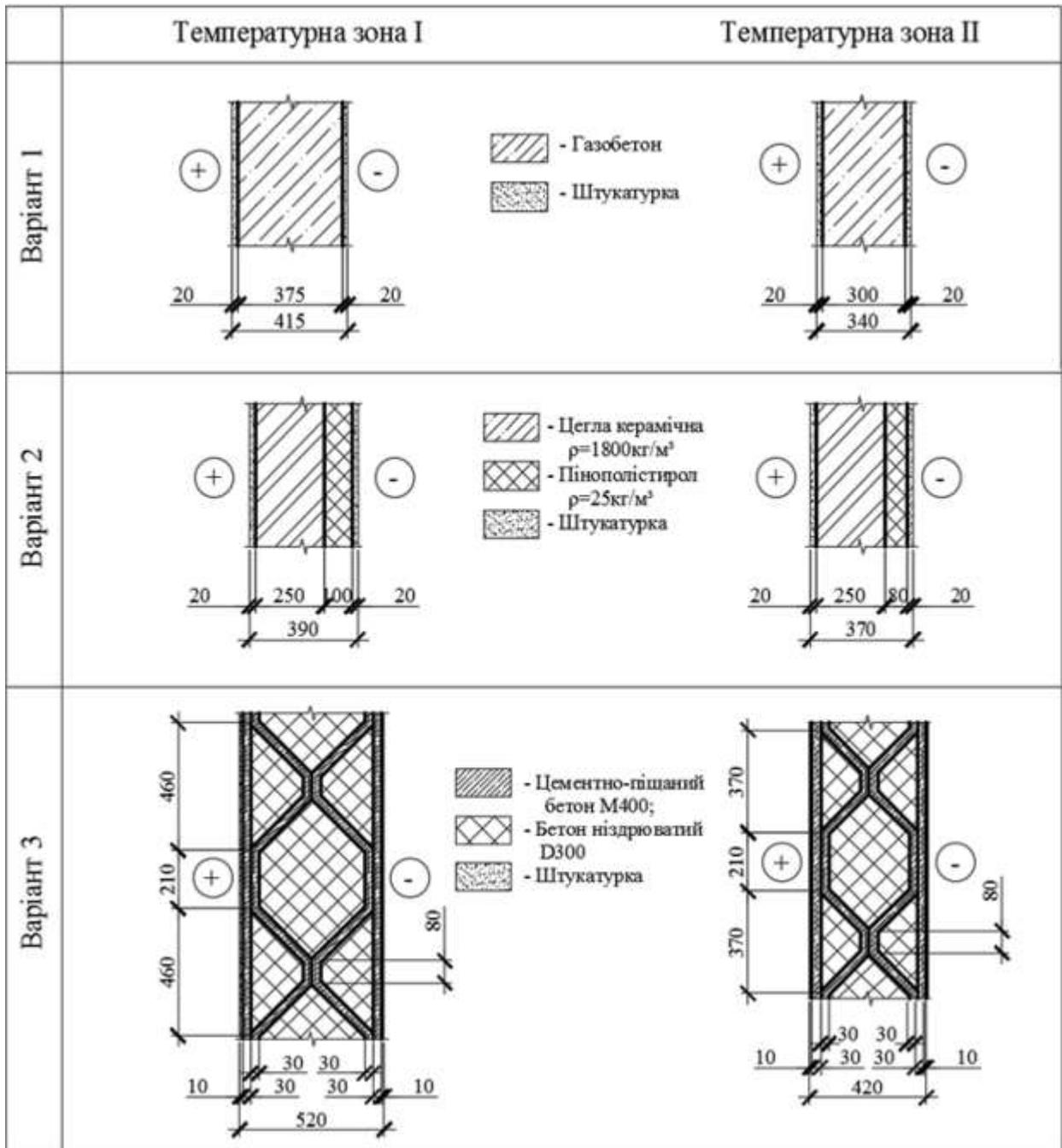


Рис. 3.5 Варіанти стінових конструкцій

Таблиця 3.2 Теплотехнічний розрахунок варіантів

№ п/п	Конструктив стіни	Температурна зона	δ_i , м	λ_{ip} , Вт/(м*К)	R_i , м ² *К/Вт	$R_{\Sigma ip}$, м ² *К/Вт
Варіант 1						
1	Внутрішня гіпсова штукатурка	I, II	0.02	0.7	0.029	Зона I: 3,96
2	Газобетон D400 B2,5	I II	0.375 0.3	0.1	3.75 3.0	
3	Фасадна цементно-піщана штукатурка	I, II	0.02		0.87	0.023
	Σ	I II	0.415 0.34			
Варіант 2						
1	Внутрішня гіпсова штукатурка	I, II	0.02	0.7	0.029	Зона I: 3,46
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 II	0.1 0.08	0.034	2.941 2.353	Зона II: 2,872
4	Фасадна цементно-піщана штукатурка	I, II	0.02		0.87	
	Σ	I II	0.39 0.37			
Варіант 3 (для 3D-принтера)						
1	Внутрішня гіпсова штукатурка	I, II	0.01	0.7	0.014	Зона I: 3,416
2	Бетон ніздрюватий D300	I II	0.26 0.24	0.09	2.889 2,444	
3	Цементно-піщаний бетон M400 для 3D-принтера	I II	0.22 0.19		0.7	0.343 0,271
4	Фасадна цементно-піщана штукатурка	I, II	0.01	0.87		0.011
	Σ	I II	0.52 0.43			

Потім було проведено техніко-економічний аналіз для оцінки вартості будівництва запропонованих варіантів зовнішніх стін, зокрема для одноповерхової будівлі розміром 10 на 10 метрів з висотою поверху 3 метри. Аналіз враховував обрану конфігурацію проекту та відповідну кліматичну зону,

включаючи обсяги матеріалів, потреби в робочій силі та міркування щодо енергоефективності.

Ця техніко-економічна оцінка забезпечує кількісну основу для визначення економічної доцільності та практичної застосовності запропонованих конструкцій стін. Поєднуючи дані про теплові характеристики з аналізом витрат, вона дозволяє визначити конструкції стін, які оптимізують як енергоефективність, так і витрати на будівництво, гарантуючи, що обрані рішення є технічно обґрунтованими та економічно виправданими для реалізації.

Таблиця 3.3 Об'єм зовнішніх стін

Варіант стіни	Одиниці виміру	Об'єм стін залежно від температурної зони	
		I	II
Стіна із газобетону D400 B2,5	м ³	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

Аналіз є необхідним для обґрунтування вибору найбільш відповідного методу будівництва для конкретного проекту. Використовуючи стандартизовані робочі коди та дані, надані виробником 3D-принтера, було розраховано показники трудомісткості та витрати матеріалів для різних методів будівництва, включаючи традиційну цегляну кладку та 3D-друк[3].

Що стосується потреб у робочій силі, для експлуатації 3D-принтера будівельного масштабу потрібно лише двоє інженерів, на відміну від більших бригад, необхідних для традиційних будівельних технологій. Будівельні витрати були розраховані з урахуванням праці, використання матеріалів та допоміжних ресурсів, включаючи воду, цементно-вапняний розчин, керамічну цеглу та газобетонні блоки. Такий підхід дозволяє провести кількісне порівняння ефективності використання ресурсів, демонструючи потенціал 3D-друку для

зменшення як трудових затрат, так і споживання матеріалів, при цьому зберігаючи структурні та функціональні вимоги до будівлі.

Таблиця 3.4 Техніко-економічні показники

Показник витрат на			1м ³ кладки	На будів- лю		1м ³ кладки	На будівлю		100м ² 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 ³	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 ³	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 ³	0,92	39,9	32,1						
По про- екту	Плити теплоізо- ляційні	м ²				2,71	110	104			
По про- екту	Цементно- піщаний бетон М400	м ³							15,4	15,4	15,3
По про- екту	Бетон ніздрюва- тий D300	м ³							41,6	41,6	31,5

Наступний етап дослідження передбачає визначення тривалості будівництва зовнішніх стін для обраної будівлі з урахуванням кожного методу будівництва. Для розрахунку тривалості робіт було використано структуровану таблицю. Такий підхід дозволяє систематично оцінювати час, необхідний для зведення стін, що дає змогу провести кількісне порівняння традиційних методів

кладки та 3D-друку. Завдяки врахуванню як матеріальних, так і трудових параметрів, аналіз забезпечує точний прогноз термінів будівництва та визначає потенційні переваги обраних технологій у плані економії часу.

Таблиця 3.5 Тривалість будівництва

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, діб	
	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

Дослідження виявило значні переваги використання технології 3D-друку для будівництва школи, на прикладі будівлі розміром 10 на 10 метрів з висотою поверху 3 метри в порівнянні з традиційними методами будівництва. Використання будівельного 3D-принтера для зведення зовнішніх стін виявилось економічно вигідним. У першій кліматичній зоні вартість будівництва була знижена приблизно на 50%, а в другій кліматичній зоні — на 55% порівняно з традиційною цегляною кладкою.

Крім того, у порівнянні з будівництвом з газобетонних блоків з еквівалентною теплостійкістю, стіни, надруковані на 3D-принтері, були приблизно на 10% дешевшими в першій кліматичній зоні і на 15% дешевшими в другій. Ці результати свідчать про економічні та часові переваги 3D-друку, що дозволяє істотно знизити витрати і прискорити завершення проекту. Така інформація забезпечує кількісну основу для прийняття обґрунтованих рішень у будівельних проектах, дозволяючи оптимізувати вибір проекту відповідно до цілей та бюджетних обмежень.

Висновок

Застосування технології 3D-друку в будівництві навчальних закладів є революційним підходом, який має технічні, економічні та екологічні переваги над

традиційними методами будівництва. Детальний аналіз 3D-друку в масштабах будівництва показав, що ця технологія дозволяє точно виготовляти стінові панелі з контрольованими розмірами, оптимізованим розподілом матеріалу та стабільними структурними властивостями. Товщина шарів, точність траєкторії інструменту та обробка після друку забезпечують необхідну механічну міцність, довговічність та теплові характеристики друкованих елементів.

Оптимізовані конструкції стін досягають значень теплопередачі від 0,25 до 0,35 Вт/м²·К, що сприяє значному зниженню енергоспоживання на опалення та охолодження. Інтеграція аналізу теплових характеристик з техніко-економічною оцінкою показала, що 3D-друк зменшує трудомісткість, використання матеріалів та загальні витрати на будівництво. Для одноповерхової будівлі розміром 10×10 метрів будівництво зовнішніх стін за допомогою 3D-друку виявилось на 50–55% дешевшим, ніж традиційне цегляне мурування і на 10–15% дешевшим, ніж будівництво з газобетонних блоків, а також дозволило швидше завершити проект.

Екологічний аналіз показав істотне зменшення відходів матеріалів, використаної енергії та викидів вуглецю в порівнянні з традиційними методами. У соціальному плані ця технологія сприяє швидкому розгортанню освітньої інфраструктури, покращує доступність дизайну та забезпечує архітектурну гнучкість, задовольняючи потреби громад. Поєднання точності, ефективності та адаптивності робить 3D-друк життєздатним рішенням для сучасного сталого будівництва.

РОЗДІЛ 4
ОПИС АРХІТЕКТУРНО-ПЛАНУВАЛЬНОГО РІШЕННЯ БУДІВЛІ
4.1 Ситуаційний план

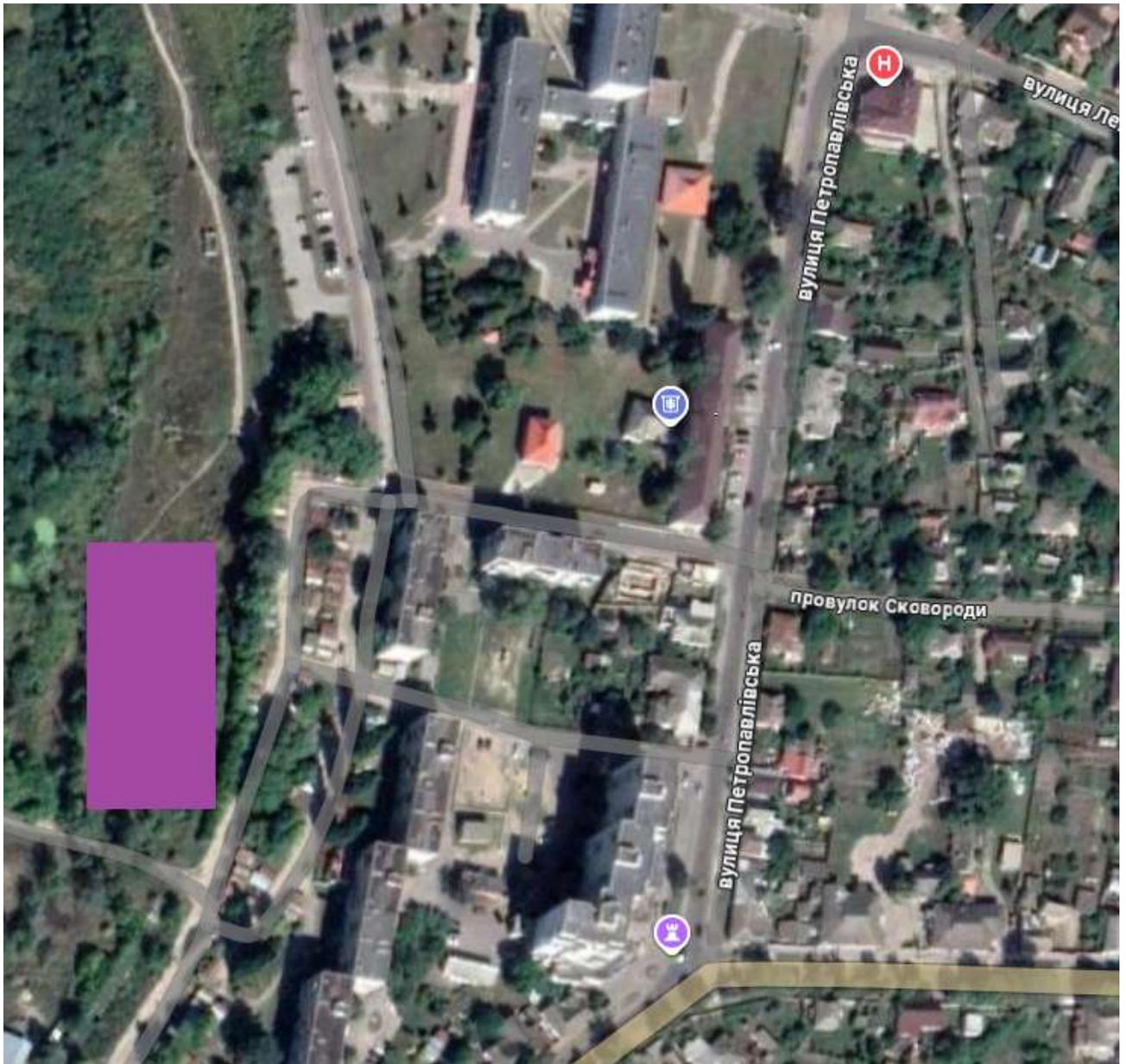


Рис. 4.1 Ситуаційний план

Загальноосвітня школа планується будуватися в житловому районі міста Охтирка неподалік вулиці Петропавлівській.

4.2 Об'ємно-планувальне рішення

Будівля школи є триповерховою залізобетонною каркасною спорудою з підвальним поверхом. Загальна висота будівлі становить 12,68 м, висота кожного

поверху – 3,3 м, що забезпечує оптимальний простір для конструктивних елементів та функціональне використання внутрішнього простору[1]. Підвальний поверх призначений для технічних та господарських потреб. На першому поверсі розташовані навчальні класи та адміністративні приміщення, а також столова та інші необхідні приміщення. На другому поверсі розташовані здебільшого навчальні класи. Третій поверх складається з відкритих залів. В першій половині школи розташовано спортивний зал, а в другій актовий зал. Також на кожному поверсі передбачені технічні приміщення, комори та санвузли.

Несучий каркас складається з збірних залізобетонних колон з квадратним перерізом 400 × 400 мм і балок з перерізом 400 × 600 мм. Система перекриттів утворена монолітними залізобетонними плитами товщиною 250 мм, безпосередньо інтегрованими в каркас, що забезпечує просторову жорсткість і рівномірний розподіл навантаження. Бетон, який використовується для цих конструктивних елементів, відповідає класу С30/37 з міцністю на стиск 30 МПа через 28 днів, що забезпечує достатню несучу здатність і довговічність. Армування виконується ребристими сталевими стрижнями, які забезпечують високу опірність розриву і надійність з'єднань як при статичних, так і при динамічних навантаженнях[8].

Процес будівництва каркаса вимагає використання важкої підйомної техніки, включаючи мобільні крани з вантажопідйомністю до 25 тонн для монтажу збірних колон і балок. Для монолітних плит використовується сталеві панельна модульна опалубка з телескопічними опорами, що забезпечує точну геометрію і безпечне заливання бетону. Заливка бетону здійснюється за допомогою автонасосів, а ущільнення свіжої суміші досягається за допомогою високонапірних занурювальних вібраторів, що усувають повітряні порожнини і гарантують рівномірну щільність і міцність[9].

Загальні розміри будівлі в плані становлять 44 800 мм по осях 1–9 і 22 400 мм по осях А-Д. Архітектурна композиція школи визначається двома

дзеркальними блоками, розташованими симетрично вздовж центральної осі. Кожен блок має головний вхід, обладнаний залізобетонними сходами та критими вхідними платформами. По периметру будівлі передбачено чотири додаткові входи для забезпечення функціональної доступності, а два окремі виходи з підвалу назовні гарантують безпечну експлуатацію та відповідність вимогам евакуації.

Вертикальна циркуляція всередині будівлі забезпечується чотирма сходовими клітками, розподіленими по плану. Сходи виготовлені з збірних залізобетонних прольотів і майданчиків, жорстко закріплених до конструктивного каркаса. Їх інтеграція забезпечує як стабільність несучої системи, так і відповідність будівельним нормам безпеки.

4.3 Архітектурно-конструктивне рішення

Фундамент

Фундаменти школи стрічковий монолітний. Ширина стрічкового фундаменту становить 1,40 м. Стіни підвалу також побудовані монолітно, утворюючи інтегровану підконструкцію. Профіль ґрунту складається з глини, піску та поверхневого шару чорнозему, що вимагає ретельного виїмки, стабільної підкладки та периметрального дренажу для контролю осідання та міграції вологи[11].

Бетон для стрічкового фундаменту та стін має клас С30/37 (міцність на стиск 30 МПа через 28 днів) і виготовлений з цементу СЕМ І 42,5 R, промитого піску та подрібненого гранітного заповнювача фракцією 5–20 мм. Армування виконується ребристими сталевими стрижнями. У стрічковому фундаменті використовуються поздовжні стрижні діаметром 18 мм з 8-міліметровими хомутами з кроком 200 мм, а в стінах підвалу — вертикальні стрижні діаметром 12–16 мм з кроком 200 мм і горизонтальні стяжки діаметром 8–10 мм з кроком 200–250 мм. Покриття армування підтримується на рівні 40 мм. Анкерні пластини з виступаючими різьбовими стрижнями (М20–М24, довжина 600–800

мм) заливаються в верхню частину фундаменту і стін підвалу для кріплення збірних колон.

Бічні поверхні фундаменту і стін підвалу захищені двошаровою полімерно-бітумною мембраною, кожна з яких має товщину 3–4 мм, загальна товщина становить близько 7–8 мм. Над гідроізоляцією кріпляться екструдовані полістирольні ізоляційні плити товщиною 50 мм, які протистоять тиску ґрунту та обмежують тепловтрати. На рівні фундаменту встановлюється перфорована ПВХ-дренажна труба діаметром 110 мм у гравійному фільтрі фракції 20–40 мм, обгорнута геотекстилем[11].

Викопування виконується гусеничними гідравлічними екскаваторами. Опалубка збирається з систем сталевих панелей на регульованих опорах. Укладання бетону виконується за допомогою насосів, встановлених на вантажівках, а ущільнення досягається за допомогою занурювальних вібраторів. Зволоження свіжого бетону підтримується протягом щонайменше семи днів за допомогою поліетиленових плівок або вологих ковдр. Засипка виконується у ущільнених шарах товщиною 200–300 мм до 95% щільності.

Для виконання робіт потрібні бригади з викопування, теслі для опалубки, арматурники, бетонники, оператори кранів і насосів, а також монтажники гідроізоляції. Нагляд здійснюють інженери-будівельники та інспектори з геотехніки[10]. Контроль якості включає випробування осідання, перевірку міцності на стиск через 7 і 28 днів, перевірку розміщення арматури, випробування адгезії гідроізоляції та ущільнення засипки.

Зовнішні, внутрішні стіни та перегородки

Стіни школи виконані за допомогою великоформатних систем 3D-друку бетоном. Загальна товщина зовнішніх стін становить 520 мм. Зовнішня і внутрішня оболонки сформовані з високоміцного конструкційного бетону класу C32/40. Цей бетон забезпечує характерну міцність на стиск 32 МПа через 28 днів, щільну структуру з водопоглинанням нижче 5% і морозостійкість, достатню для щонайменше 200 циклів заморожування-розморозування. Друковані шари

укладаються з діаметром сопла 40-50 мм, керованого автоматизованим робототехнічним обладнанням з комп'ютерною точністю ± 2 мм. Внутрішня порожнина між оболонками заповнюється пористим бетоном, що забезпечує середню суху щільність 300 кг/м^3 і коефіцієнт теплопровідності приблизно $0,09\text{--}0,10 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Цей наповнювач забезпечує ізоляцію, зменшує загальну вагу стін і покращує вогнестійкість, обмежуючи теплопровідність[16].

Зовнішня та внутрішня поверхні стін оброблені штукатуркою, нанесеною рівномірним шаром товщиною 20 мм. Штукатурка виготовлена на основі цементно-вапняного розчину з полімерними модифікаторами, що забезпечує адгезію до поверхні друкованого бетону, паропроникність та стійкість до усадочних тріщин. Фінішний шар не тільки забезпечує гладку архітектурну поверхню, але й захищає конструкційний бетон від прямого впливу навколишнього середовища.

Внутрішні перегородки побудовані з панелей товщиною 150 мм. Їх зменшена товщина порівняно із зовнішніми стінами забезпечує ефективне використання внутрішнього простору, одночасно забезпечуючи достатню звукоізоляцію та вогнестійкість. Монтаж перегородок здійснюється за допомогою мобільних кранів вантажопідйомністю 3–5 тонн, а стики ущільнюються цементною затіркою для досягнення монолітних характеристик.

Перемички над дверними та віконними отворами інтегровані безпосередньо в систему стін, надрукованих на 3D-принтері. Під час процесу друку арматурні клітки з ребристої сталі B500 діаметром 12–14 мм вставляються в призначені для цього виїмки, а навколо них безперервно друкується високоміцний бетон. Це забезпечує повну структурну цілісність стіни та усуває необхідність у окремих збірних перемичках. Завдяки інтеграції перемичок у друковану геометрію уникнути слабких місць у отворах, а структурні навантаження розподіляються рівномірно по всій системі стін[9].

Будівництво таких стін вимагає скоординованої роботи спеціалізованого обладнання та персоналу. Для виготовлення стін використовується 3D-принтер

для бетону порталного типу з висотою друку понад 12 м, який обслуговується кваліфікованою командою фахівців з цифрового виробництва. Для забезпечення якості проводиться постійний моніторинг швидкості екструзії, реології матеріалу та зчеплення шарів. Пористий бетон закачується в порожнини за допомогою шнекових насосів, а штукатурка наноситься за допомогою механічних розпилювачів. Контроль матеріалів включає випробування на місці бетону на текучість, випробування друкованих зразків на міцність на стиск та перевірку щільності пористого бетону.

Перекриття та покрівля

Конструкції перекриттів школи виконані у вигляді монолітних залізобетонних плит товщиною 250 мм. Ці плити залиті на місці з використанням високоміцного бетону класу С30/37, який забезпечує характерну міцність на стиск 30 МПа і гарантує довготривалу стійкість як під статичними, так і під динамічними навантаженнями. Плити армовані ребристими сталевими стержнями, розташованими в ортогональних шарах зі стандартним кроком 200 мм, утворюючи суцільну арматурну сітку. По краях плит і в місцях зосередженого навантаження встановлюються додаткові арматурні стержні діаметром 14–16 мм для підвищення стійкості до зсуву і запобігання локальному утворенню тріщин. Опалубка для плити виконується за допомогою багаторазових сталевих опалубних систем, що підтримуються телескопічними опорами, що забезпечує точну геометрію і якість поверхні. Бетон заливається за допомогою автобетононасосів з стрілами подачі 28-36 м і ущільнюється для досягнення однорідної щільності і усунення порожнин[12].

Дах будівлі спроектований як шатровий дах, що спирається на верхню залізобетонну плиту. Несуча конструкція складається з дерев'яних елементів, включаючи крокви, прогони та конькові балки, виготовлених з м'яких порід деревини класу міцності С24, висушених до залишкової вологості 12–15%. Всі дерев'яні елементи стругані та оброблені антисептичними та вогнезахисними просоченнями, що забезпечує стійкість до біологічного руйнування, грибків та

комах, одночасно підвищуючи клас вогнестійкості конструкції. Крокви з'єднані оцинкованими сталевими пластинами та болтами.

Покриття виконується з використанням конструкційних фанерних панелей товщиною 18–21 мм, які кріпляться до крокв корозієстійкими саморізними гвинтами з кроком 150 мм. Ця фанерна обшивка забезпечує жорстку і суцільну основу для гідроізоляційного шару. Зовнішня поверхня даху оброблена гнучким покриттям у вигляді черепиці, багат шаровим полімерно-бітумним матеріалом, армованим скловолокном. Вона укладається в перекриваючих рядах, скріплюється самоклеючими смугами та механічними кріпленнями, що забезпечує водонепроникність і стійкість до підйому вітром. При належному обслуговуванні система покрівлі має термін експлуатації не менше 25–30 років.

Всі відкриті дерев'яні елементи в конструкції даху додатково покриваються захисними шарами лаку для стабілізації поверхневого вологообміну та зменшення деформації розмірів під впливом навколишнього середовища. Конструктивні стики герметизуються поліуретановими сумішами для запобігання проникненню повітря та води[12].

У конструкцію даху інтегрована повна система відведення дощової води. Готові ПВХ-жолоби діаметром 125 мм кріпляться вздовж карнизів за допомогою регульованих кронштейнів, що забезпечує належний ухил до водостічних труб. Вертикальні водостічні труби діаметром 100 мм відводять воду в підземні колектори дощової води. Всі елементи системи водовідведення є стійкими до УФ-випромінювання та закріплені за допомогою гнучких швів для компенсації теплових рухів[4].

Вікна та двері

Вікна та двері школи спроектовані таким чином, щоб забезпечити достатнє природне освітлення, теплоізоляцію та довготривалу міцність в умовах інтенсивної експлуатації. Більшість класів, адміністративних приміщень та службових кімнат обладнані пластиковими вікнами з потрійним склінням. Ці вікна складаються з жорстких профілів з полівінілхлориду, армованих вставками

з оцинкованої сталі, що забезпечує стійкість до механічних деформацій. Скляні блоки складаються з трьох герметично закритих скляних панелей загальною товщиною 40–44 мм, з низькоемісійним (Low-E) покриттям та заповненням аргоном у проміжках між панелями. Така конфігурація забезпечує коефіцієнт теплопередачі 0,9–1,1 Вт/м²·К, що відповідає сучасним вимогам енергоефективності. Прокладки виготовлені з каучуку, що забезпечує герметичність і водонепроникність, а багатоточковий замок гарантує безпеку і рівномірний розподіл тиску по всьому периметру ущільнення. Монтаж виконується з використанням вирівнювальних інструментів, поліуретанової піни для ущільнення швів і зовнішніх гідроізоляційних стрічок для запобігання тепловим мостам і проникненню вологи[2].

У деяких функціональних зонах, таких як актовий зал і спортивний зал, використовуються збільшені панорамні вікна, що забезпечують проникнення денного світла і візуальний зв'язок із зовнішнім середовищем. Ці засклені конструкції підтримуються алюмінієвими рамами з терморозривом, розробленими для витримування підвищених вітрових навантажень і теплових рухів без порушення герметичності. У цих зонах використовується ламіноване безпечне скло товщиною від 6 до 10 мм залежно від розміру панелі, що підвищує ударостійкість. Для забезпечення стабільності як при вертикальних, так і при горизонтальних навантаженнях застосовуються структурні силіконові герметики та приховані механічні анкери.[15]

Зовнішні та внутрішні дверні системи виготовляються з металопластикових композитних профілів. Конструкційна основа кожної двері складається з жорсткої сталеві арматурної рами, яка обшита ПВХ-профілями, що забезпечують теплоізоляцію та стійкість до атмосферних впливів. Дверні полотна заповнені поліуретановою пінопластовою ізоляцією, що забезпечує баланс між структурною жорсткістю та тепловими характеристиками. Прозорі вставки, де вони застосовуються, виготовлені з подвійного безпечного скла з армованими прокладками. Петлі розраховані на 200 000 циклів, а замки оснащені

багатоточковими системами закриття для підвищення безпеки[14]. Поверхні оброблені міцними полімерними покриттями, стійкими до подряпин, УФ-випромінювання та хімічних засобів для чищення.

Зовнішнє та внутрішнє опорядження

Фасад школи спроектований таким чином, щоб поєднувати довговічність, низькі витрати на обслуговування та естетичну якість, доповнюючи загальну архітектурну композицію будівлі. Зовнішні стіни оздоблені високоякісною цементно-вапняною штукатуркою, нанесеною рівномірними шарами безпосередньо на стіни, що забезпечує гладку та стабільну основу. Поверх штукатурки поверхня покрита мінеральною фарбою для зовнішніх робіт, обраною за її стійкість до УФ-випромінювання, вологи та перепадів температури. Шар фарби номінальною товщиною 0,2–0,3 мм забезпечує довготривале збереження кольору та захищає штукатурку і бетон від атмосферних впливів і поверхневого руйнування[17].

Нанесення покриття виконується за допомогою механізованого розпилювального обладнання в поєднанні з ручним затиранням, щоб забезпечити рівномірне покриття, особливо навколо кутів, отворів і архітектурних деталей. Фарба пропускає пари і запобігає накопиченню вологи всередині стінової конструкції, а також забезпечуючи візуально однорідний, естетично привабливий вигляд. Краї навколо вікон і дверей ретельно маскуються і герметизуються, щоб запобігти проникненню дощової води і забезпечити щільне з'єднання між пофарбованими поверхнями і встановленими елементами вікон.

Внутрішнє оздоблення школи виконано з урахуванням вимог до довговічності, гігієни, безпеки та комфорту у всіх функціональних зонах. У класах, адміністративних приміщеннях та коридорах підлога викладена полірованою керамічною плиткою товщиною 10 мм, з високою стійкістю до стирання та протиковзкістю R10, закріпленою полімермодифікованим цементним клеєм та затертою епоксидним розчином для забезпечення водостійкості та довговічності. У вологих приміщеннях, включаючи санвузли та

їдальню, підлога складається з антиковзної керамічної плитки товщиною 12 мм, хімічно стійкої до миючих засобів, яка механічно закріплена на бетонній основі. У спортивному залі встановлено масивну паркетну підлогу з ламінованих букових блоків товщиною 22 мм, укладену на еластичну фанерну підкладку для забезпечення амортизації та відповідної еластичності для занять спортом[7].

Поверхні стін у класах, коридорах та адміністративних приміщеннях оздоблені цементно-вапняною штукатуркою товщиною 20 мм, а потім двома шарами акрилової фарби для внутрішніх робіт з номінальною товщиною 0,15 мм на шар, що забезпечує гладку поверхню, стійку до щоденного зносу. У вологих приміщеннях стіни облицьовані керамічною плиткою товщиною 10 мм на висоту до 2,2 м, а вище поверхні пофарбовані вологостійкою акриловою фарбою. Стіни актового залу та спортивного залу оздоблені цементно-вапняною штукатуркою та покриті двошаровою акриловою фарбою на водній основі.

Стелі у всій будівлі виконані у вигляді підвісних гіпсокартонних систем із використанням вологостійких гіпсокартонних плит товщиною 12,5 мм, закріплених на оцинкованій сталевій рамі з С-профілів. У класах, адміністративних приміщеннях та коридорах стелі оздоблені гладким шаром шпаклівки для швів і пофарбовані водоемульсійною акриловою фарбою. В їдальні та санітарних зонах гіпсокартонні плити оброблені водовідштовхувальним ґрунтовкою і покриті двома шарами вологостійкої фарби. Стелі актового залу та спортивного залу оброблені відкритими поверхнями гіпсокартону з вбудованими кріпильними точками для акустичних панелей, освітлювальних приладів та дифузорів механічної вентиляції. Всі стики стелі та стін ущільнені вогнестійким силіконом та розширювальними профілями[6].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Благоустрій територій (зі Змінами): ДБН Б.2.2-5:2011 [Чинний від 2012-09-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2019. – 44 с. (Національні стандарти України).
2. Вікна та двері: ДСТУ EN 14351-1:2020. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 23 с.
3. Заяць Є., Богданов І., Невгомонний Г., Мерилова І., Речиц О. Особливості використання технологій 3D-друку в будівництві. // Містобудування та територіальне планування. – Київ : КНУБА, Україна, 2021. – С. 83–93.
4. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування: ДБН В.2.5-75:2013. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. – 38 с. (Національні стандарти України).
5. Кошторисні норми України «Настанова з визначення вартості будівництва»: [Чинний від 2021-11-09]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2021. – 44–46 с. (Національні стандарти України).
6. Кошторисні норми України. Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи. Оздоблювальні роботи. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2021. – 52 с.
7. Кошторисні норми України. Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи. Підлоги. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2021. – 47 с.
8. Навантаження і впливи. Норми проектування: ДБН В.1.2-2:2016 [Чинний від 2017-10-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. – 13–16 с. (Національні стандарти України).
9. Організація будівельного виробництва: ДБН А.3.1-5:2016 [Чинний від 2016-01-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. – 44–46 с. (Національні стандарти України).
10. Охорона праці і промислова безпека в будівництві: ДБН А.3.2-2-2009 [Чинний від 2012-04-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. – 53–54 с. (Національні стандарти України).

11. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення: ДБН В.2.1-10:2018. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. – 56 с.
12. Покриття будівель і споруд: ДБН В.2.6-220:2017. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. – 72 с.
13. Пиндзин М., Іванов-Костецький С.О. Перспектива використання технології 3D-друку для будівництва житлових будинків в Україні. // SA (Архітектура). – Львів : Львівська політехніка, Україна, 2024. – С. 144–152.
14. Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1.7-2016 [Чинний від 2017-06-01]. – Київ : Держбуд України, 2017. – 84 с. (Національні стандарти України).
15. Природне і штучне освітлення: ДБН В.2.5-28:2018 [Чинний від 2019-02-28]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. – 7 с. (Національні стандарти України).
16. Склад та зміст проектної документації на будівництво: ДБН А.2.2-3-2014 [Чинний від 2014-10-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. – 10 с. (Національні стандарти України).
17. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2016 [Чинний від 2016-10-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. – 15 с. (Національні стандарти України).
18. Comparative Review of the Technology and Case Studies of 3D Concrete Printing of Buildings by Several Companies / N. Bello, A. Memari. – Buildings, 2023, 13(1), Art. 106.