

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування факультету)

Кафедра Будівельного виробництва та управління проектами
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему РОЗРОБКА КОМПОНЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ ШЛАКОВИХ В'ЯЖУЧИХ З
ВИКОРИСТАННЯМ АНГІДРИДІВ
DEVELOPMENT OF COMPONENTS OF CONSTRUCTION SLAG BINDERS USING
ANHYDRIDES

Виконав: студент II курсу, групи БАД-114м

Спеціальності 192 Будівництво та цивільна
інженерія

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Промислове та цивільне будівництво

ШВЕЦЬ І.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник НАЗАРЕНКО О.М.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент КАМЄНЄВ О.С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Будівництва, архітектури та дизайну

Кафедра Будівельного виробництва та управління проектами

Ступінь вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Промислове та цивільне будівництво

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри БВУП

к.т.н., доцент Олексій НАЗАРЕНКО

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

ШВЕЦЬ Ігор Володимирович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка компонентів будівельних шлакових в'язучих з використанням ангідридів. Development of components of construction slag binders using anhydrides

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доцент НАЗАРЕНКО Олексій Миколайович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «_____» жовтня 2025 року № _____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 11 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) рекомендована література, технічне завдання, інженерно-геологічні умови

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Архітектурно-будівельний розділ. 2. Розрахунково-конструктивний розділ. 3. Організаційно-технологічний розділ. 4. Охорона праці та цивільна безпека. 5. Науково-дослідний розділ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) Слайди презентації, графічний матеріал 8 аркушів А1 роздруковані на А3 з титульним аркушем та зброшуровані

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Архітектурно-будівельний розділ	НАЗАРЕНКО О.М., доцент		
Розрахунково-конструктивний розділ	НАЗАРЕНКО О.М., доцент		
Організаційно-технологічний розділ	НАЗАРЕНКО О.М., доцент		
Охорона праці та цивільна безпека	ЯКІМЦОВ Ю.В., доцент		
Науково-дослідний розділ	НАЗАРЕНКО О.М., доцент		
Нормоконтролер	БОБРАКОВ А.А., доцент		

7. Дата видачі завдання «01» жовтня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Постановка завдань по роботі	1 тиждень	Завдання
2	Розробка архітектурно-будівельних рішень.	2-3 тижні	Розділ 1
3	Розробка розрахунково-конструктивної частини.	3-5 тижні	Розділ 2
4	Прийняття організаційно-технологічних рішень	5-6 тижні	Розділ 3
5	Розробка технологічної частини роботи	7 тиждень	Розділ 4
6	Розробка заходів з охорони праці та цивільної безпеки.	8 тиждень	Розділ 5
7	Виконання науково-дослідної частини	9-10 тиждень	Розділ 6
8	Оформлення пояснювальної записки та документів до неї	11 тиждень	
9	Оформлення графічної частини	12-13 тиждень	Розділи 1-5
10	Нормоконтроль та рецензування	13-14 тиждень	
11	Перевірка на плагіат	15 тиждень	
12	Захист роботи.	16 тиждень	

Студент

(підпис)

Ігор ШВЕЦЬ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Олексій НАЗАРЕНКО

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи магістра: 106 с., 18 табл., 18 рис., 40 джерел.

ПРОМИСЛОВА БУДІВЛЯ, АНГІДРИДИ, БУДІВЕЛЬНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ДОВГОВІЧНІСТЬ БУДІВЕЛЬ, ГІДРАТАЦІЯ, АКТИВАЦІЯ ШЛАКУ

Структура та обсяг роботи. Робота є науковим дослідженням на тему використання шлакових в'язучих з ангідридами, механізми їх взаємодії з компонентами в'язучих систем, а також наведено аналіз впливу модифікуючих добавок на процеси тверднення та властивості будівельних матеріалів. Робота охоплює п'ять основних розділів – архітектурно-будівельний, розрахунково-конструктивний, організаційно-технологічний, розділ з охорони праці та пожежної безпеки, а також науково-дослідницький розділ.

Методи дослідження – ґрунтуються на поєднанні аналітичних, експериментально-теоретичних і системних методів, що застосовуються при дослідженні властивостей будівельних матеріалів і технологічних процесів їх отримання. У роботі використано аналіз наукових джерел, узагальнення літературних даних, порівняльний аналіз механізмів тверднення шлакових в'язучих.

Об'єкт дослідження – промислова будівля в м. Запоріжжя й шлакові в'язучі матеріали, що застосовуються у будівельному виробництві.

Предмет дослідження – механізми взаємодії шлакових в'язучих з ангідридами та їх вплив на процеси гідратації, тверднення і формування структури матеріалу.

Актуальність теми зумовлена необхідністю розширення сировинної бази будівельних матеріалів, підвищення ефективності використання промислових відходів та зниження енергоємності виробництва в'язучих. Використання шлакових в'язучих з модифікувальними добавками ангідридів дозволяє отримувати матеріали з регульованими властивостями, зменшувати витрати традиційних цементів та підвищувати довговічність будівельних конструкцій, що є особливо важливим для промислового будівництва.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis: 106 pages, 18 tables, 18 figures, 40 sources.

INDUSTRIAL BUILDING, ANHYDRIDES, BUILDING MATERIALS SCIENCE,
DURABILITY OF BUILDINGS, HYDRATION, SLAG ACTIVATION

Structure and scope of the work. The work is a scientific study devoted to the use of slag binders with anhydrides, the mechanisms of their interaction with the components of binder systems, as well as the analysis of the influence of modifying additives on hardening processes and the properties of building materials. The work consists of five main sections: architectural and building, structural design, organizational and technological, occupational and fire safety, and a research section.

Research methods are based on a combination of analytical, experimental–theoretical, and system-based methods applied in the study of the properties of building materials and the technological processes of their production. The study employs analysis of scientific sources, generalization of literature data, and comparative analysis of hardening mechanisms of slag binders.

Object of research – an industrial building in the city of Zaporizhzhia and slag binder materials used in construction practice.

Subject of research – the mechanisms of interaction between slag binders and anhydrides and their influence on hydration, hardening processes, and the formation of material structure.

Relevance of the topic is determined by the need to expand the raw material base of building materials, increase the efficiency of industrial waste utilization, and reduce the energy intensity of binder production. The use of slag binders with modifying anhydride additives makes it possible to obtain materials with controlled properties, reduce the consumption of traditional cements, and increase the durability of building structures, which is particularly important for industrial construction.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АРХІТЕКТУРНО-БУДІВЕЛЬНИЙ.....	9
1.1 Планування ділянки під будівництва.....	9
1.2 Об'ємно-планувальні рішення.....	11
1.3 Прийняті конструктивні рішення.....	12
1.4 Оздоблення промислової будівлі.....	15
1.5 Інженерні мережі.....	16
1.6 Теплотехнічний розрахунок огорожувальних конструкцій.....	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ.....	20
2.1 Опис прийнятої до розрахунку конструкції.....	20
2.2 Збір навантажень на ферму.....	21
2.3 Створення розрахункової схеми.....	23
2.4 Визначення зусиль в програмному комплексі.....	24
2.5 Розрахунок ферми по несучій здатності.....	27
2.6 Висновки щодо проектування металеві ферми.....	30
РОЗДІЛ 3. ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	31
3.1 Технологічна карта на влаштування траншей під фундаменти.....	31
3.1.1 Визначення обсягів БМР для технологічної карти.....	32
3.1.2 Виконання основних технологічних операцій.....	34
3.2 Розрахунок крану для виконання БМР.....	36
3.3 Календарне планування будівельного виробництва.....	40
3.4 Проектування будівельного генплану.....	42
3.4.1 Розрахунок площ складів.....	42
3.4.2 Визначення площ тимчасових будівель та споруд.....	44
3.4.3 Розрахунок потреби у водопостачанні.....	46
3.4.4 Визначення необхідної потужності для проведення БМР.....	48
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ В БУДІВНИЦТВІ.....	50
4.1 Ідентифікація професійних ризиків.....	50

	7
4.2 Заходи щодо безпечних умов праці.....	53
4.3 Пожежна безпека будівельного майданчику	55
4.4 Пожежна безпека на будівельному майданчику	58
РОЗДІЛ 5. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	60
5.1 Теоретичні основи використання шлакових в'язучих з ангідридами	60
5.1.1 Класифікація та властивості доменних шлаків. Активування шлакових в'язучих.....	61
5.1.2 Огляд ангідридів у будівельних матеріалах та їх властивості.....	65
5.1.3 Механізми взаємодії ангідридів зі шлаками та мінеральними компонентами.....	68
5.1.4 Перспективи використання ангідридів у модифікованих в'язучих системах.....	73
5.2 Методи розробки та синтезу компонентів в'язучих	77
5.2.1 Вибір та підготовка сировинних матеріалів	77
5.2.2 Активація та механізм тверднення шлако-ангідритового в'язучого	82
5.2.3 Технологічні підходи до активації та створення композитів	89
5.2.4 Експериментальна оптимізація формулювань та моделювання процесів	90
5.2.5 Нові підходи до інтеграції добавок для підвищення ефективності..	91
5.3 Властивості розроблених в'язучих, застосування та оцінка	91
5.3.1 Механічні та фізичні характеристики	91
5.3.2 Довговічність, стійкість до агресивних середовищ та застосування в будівництві	95
5.3.3 Екологічна оцінка.....	99
ВИСНОВКИ	102
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	103

ВСТУП

Житлове будівництво є одним із головних чинників соціального та економічного розвитку кожного регіону. В умовах післявоєнного відновлення України питання забезпечення населення якісним, комфортним і доступним житлом набуває особливої ваги.

Відновлення житлового фонду сприяє не лише покращенню умов проживання громадян, а й стимулює розвиток суміжних галузей.

Актуальність дипломного проекту визначається потребою у швидкому відновленні житлового фонду та створенні сучасних будівель, які відповідатимуть вимогам енергоефективності, надійності, безпеки та екологічності. Забезпечення громадян житлом належної якості є важливою передумовою підвищення рівня життя, соціальної стабільності та економічного зростання регіону.

Метою дипломного проекту є розроблення 17-поверхового двосекційного житлового будинку у Київському регіоні, який має відповідати чинним будівельним нормам і сучасним уявленням про комфорт та зручність.

Проект передбачає створення гармонійного житлового середовища, яке задовольняє потреби різних категорій мешканців – молодих сімей, людей похилого віку та осіб з обмеженими можливостями.

Для цього об'єкта капітального будівництва було розроблено шість розділів, які охоплюють усі ключові аспекти реалізації проекту.

Розроблений проект є прикладом сучасного, енергоефективного та екологічно безпечного житла, яке відповідає вимогам комфорту й раціонального використання простору.

У цьому дослідженні розглянуто методологію підвищення організаційної надійності під час зведення житлових будівель, розроблено модель оцінювання її показників і визначено шляхи практичного застосування отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1. АРХІТЕКТУРНО-БУДІВЕЛЬНИЙ

1.1 Планування ділянки під будівництва

Будівельний майданчик розташований на вільній від забудови території у місті Запоріжжя. Розміри ділянки складають 96×36 м, орієнтована територія з півночі на південь. Абсолютна відмітка рельєфу варіюється від 100,5 м до 101 м. Майданчик розташований на схилі невеликого пагорба з ухилом 1,5%, що є сприятливим для природного водовідведення та зменшує ймовірність підтоплення фундаменту за умови належної організації дренажу.

Для вивчення геологічних умов майданчика було пробурено 4 свердловини, в результаті яких були розкриті такі шари ґрунту:

Шар №1: Насипний ґрунт, густина якого складає 1,6 т/м³, потужністю від 0,5 до 2 м. Цей шар не є природною основою для будівництва через його нестабільність, тому перед початком зведення будівлі його необхідно зрізати та складувати. Після зрізання насипного ґрунту на цьому місці можна закладати фундамент.

Шар №2: Супесь сіра легка, потужність цього шару варіюється від 4 до 6,5 м. Ґрунт ущільнений, пластичний, насичений водою, проте він не піддається значному просіданню або стисненню. Цей шар є підходящим для використання як природну основу для фундаментів.

Шар №3: Суглинок з включенням гравію та гальки, потужністю від 7,3 до 10 м. Ґрунт твердіший, ущільнений, пластичний, насичений водою, але не схильний до просідання і має низьку стисливість. Цей шар також може бути використаний як основа для будівництва.

Максимальний рівень ґрунтових вод прогнозується на позначці 97,4 м, що знаходиться вище абсолютної відмітки майданчика, що не створює ризику підтоплення фундаменту. Ґрунтові води не є агресивними щодо бетону, що дозволяє використовувати стандартні методи бетонування при зведенні фундаментів без обмежень.

Враховуючи ці характеристики ґрунтів, будівельний майданчик має стабільні умови для зведення будівель.

У цьому контексті для забезпечення надійності конструкцій, які будуть зведені на цьому майданчику, важливо провести додаткові інженерні заходи з укріплення схилу та організації дренажних систем, особливо на ділянках з перепадами висот. Здійснення таких заходів дозволить знизити ризик можливих зсувів і забезпечити довговічність будівель.

ТЕП генплану наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Техніко-економічні показники генплану

Показники	Значення	Одиниці виміру	Примітка
Площа території підприємства	26640	м ²	По забору-огороженню
Площа забудови	6151,54	м ²	
Площа внутрішньозаводських доріг та майданчиків з твердим покриттям	5410,6	м ²	
Площа озеленення	11188,8	м ²	
Коефіцієнт озеленення	0,42	-	
Коефіцієнт щільності забудови	0,23	-	
Коефіцієнт дорожніх покриттів	0,35	-	

Відстань до найближчої будівлі відповідає вимогам нормативів і знаходиться в межах допустимих значень. Зовнішнє пожежогасіння забезпечується через пожежні гідранти, які підключені до водопровідної мережі на будівельному майданчику.

Вертикальне планування майданчика виконано згідно з проектними горизонталями, які відповідають топографічним та гідрогеологічним умовам ділянки. Рельєф майданчика спокійний, без різких перепадів висот. Відведення поверхневих вод передбачено через відкриті водовідвідні канали, що розташовані вздовж бордюрів. Вода, що стікає з майданчика, скидається у

знижені місця рельєфу або в спеціальні водовідвідні канали, що гарантує відсутність затоплень.

Озеленення прилеглої території до проектованої будівлі передбачає створення газонів з висадкою багаторічної низькорослої трави, а також посадку декоративного чагарнику та дерев.

1.2 Об'ємно-планувальні рішення

Будівля запроектована одноповерховою з розмірами в плані $96,0 \times 36,0$ м. Вона складається з одного поздовжнього прольоту довжиною 60 м і шириною 24 м, а також двох поперечних прольотів довжиною 36 м і 36,23 м та шириною 18 м кожен. Висота до низу кроквяних ферм поздовжнього прольоту складає 8,4 м, поперечних прольотів – 6 м. Між поздовжніми та поперечними прольотами будівлі передбачено влаштування деформаційних швів.

У будівлі передбачається 10 воріт для в'їзду та виїзду вантажного автотранспорту, а також 2 двері для входу в поздовжній проліт. Об'ємно-планувальне рішення базується на технологічному процесі заводу зварювальних матеріалів. Функціональна схема заводу забезпечує раціональну організацію та зручну роботу цехів, що відповідають потребам виробництва.

Для переміщення матеріалів у межах цеху використовуються навантажувачі різних типів, візки, а також 2 монорейки з вантажопідйомністю 3,2 т. Це забезпечує ефективне транспортування матеріалів на території заводу.

Щодо евакуаційних шляхів, ширина евакуаційних виходів (дверей) визначається згідно з ДСТУ 7313:2013 Знаки безпеки та системи евакуаційні фотолюмінесцентні. Загальні вимоги та методи контролювання. Враховуючи вимоги, евакуаційними виходами з будівлі також можуть бути хвіртки, що розташовані у воротах для транспорту.

Техніко-економічні показники (ТЕП) будівлі наведено в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Техніко-економічні показники будівлі

Показники	Значення	Од. вим.	Примітки
Площа забудови	5340,7	м ²	-
Корисна площа	5340,7	м ²	-
Робоча площа	5340,7	м ²	-
Будівельний об'єм	63554,3	м ³	-
Відношення робочої площі до корисної	1,0	-	-
Відношення об'єму до робочої площі	11,9	-	-

1.3 Прийняті конструктивні рішення

Будівля спроектована з використанням сталевих каркасів з кроквяними фермами, що є основою конструктивної схеми. Основними елементами каркасу є поперечні рами, які утворюються колонами, жорстко кріпленими до фундаментів за допомогою анкерних болтів, та кроквяними фермами, що шарнірно з'єднані з цими колонами. Така конструкція дає змогу створити рамно-зв'язкову систему, яка забезпечує надійність та стабільність будівлі.

При виборі основних несучих елементів будівлі, а також їх вузлів та конструкцій, використовувалися типові серії, що дозволяє знизити витрати на проектування та будівництво, за умови відповідності проектним вимогам. Розміри фундаментів були прийняті згідно з конструктивними вимогами та особливостями ґрунтових умов будівельного майданчика.

Фундаменти

Під колони каркасу передбачено монолітні залізобетонні фундаменти з бетону марки С16/20, що мають одноступінчасту плитну частину на дрібному ґравії. Висота фундаментів складає 1,8 м, а відмітка низу підшви фундаментів знаходиться на рівні -2,300 м. Враховуючи умови будівельного майданчика та

навантаження, для стабільності конструкцій передбачено укладання збірних залізобетонних фундаментних балок висотою 450 мм.

Для запобігання впливу ґрунтових вод та забезпечення водонепроникності, на підшву фундаменту укладається бетонна підготовка товщиною 100 мм з бетону марки С8/10, що виступає за межі фундаменту на 100 мм. Крім того, для гідроізоляції передбачено застосування вертикальної гідроізоляції у вигляді обмазки гарячим бітумом за два шари, а горизонтальна гідроізоляція виконується двома шарами гідроізолу на бітумній мастиці.

Колони будівлі є основними несучими елементами та розташовані в кількох зонах відповідно до вимог проекту. Всього для будівлі передбачено три виробничі цехи. У залежності від висоти прольотів будівлі та призначення колон, застосовуються різні типи і серії металевих колон, що подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Різновиди прийнятих колон

№ п/п	Висота прольоту, м	Розташування, призначення колони	Типова серія	Марка
1	8,4	крайня		
2	6,0	крайня	1.424-4	
3	8,4, 6,0	фахверкова		

Прив'язка колон до поздовжніх осей будівлі здійснена таким чином, що зовнішні грані крайніх колон мають нульову прив'язку, а для середніх колон прив'язка виконана по центру, що відповідає геометричній осі симетрії. У торцях прольотів прив'язка колон до крайніх поперечних осей прийнята на відстані 500 мм.

Ферми виготовлені з труб квадратного перерізу, що забезпечує необхідну міцність і стійкість конструкції. Для забезпечення жорсткості між

колонами влаштовуються металеві зв'язки, виконані з прокатних профілів (куточків).

Зв'язки розташовуються в поздовжньому прольоті будівлі в осях 8-9 по поздовжніх рядах Г і І, а також у поперечних прольотах будівлі в осях Д-Е по рядах 1 і 4, а в осях Б-В по рядах 12/1, 16, 19.

Просторова жорсткість покриття забезпечується вертикальними та горизонтальними зв'язковими фермами з прокатних куточків. Всі зв'язки встановлюються в торцях прольотів для забезпечення стабільності конструкції.

Зовнішні стіни будівлі виконані з сталевих панелей типу «Сендвіч», товщиною 100 мм з полімерним покриттям і утеплювачем ISOVER. Панелі кріпляться до стінових ригелів за допомогою самонарізних гвинтів ДСТУ EN ISO 1481:2022. Ригелі стінового каркаса прийняті з гнутих швелерів і кріпляться болтами до колон каркасу будівлі. Крок ригелів стінового каркаса визначено з урахуванням вітрового навантаження та розрахункової схеми панелей.

Внутрішні стіни виконані з силікатної цегли товщиною 250 мм, а перегородки – з силікатної цегли товщиною 120 мм. Перекриття над внутрішніми приміщеннями спроектовано з багатопустотних збірних залізобетонних плит покриття завтовшки 220 мм.

Покрівля будівлі має малий ухил 1,5% і виготовлена з техноеласту завтовшки 130 мм. Покрівля утеплена двошаровою системою ізоляції ISOVER. Водостік для поздовжнього прольоту організований внутрішній. Для плоскої покрівлі з водовідведенням за стандартами, з розрахунку на 1000 м² покриття має припадати не більше однієї водостічної вирви.

Оскільки площа покрівлі складає 24×60 м, за формулою (1.1):

$$n_x = B \times L / 1000 \quad (1.1)$$

де B – ширина покрівлі, L – довжина, для цього проекту отримано:

$$n_x = 24 \times 60 / 1000 \approx 1 \text{ вирва}$$

Приймається 4 водостічні вирви для покрівлі з розрахунком на максимальну кількість води. Водостік для поперечних прольотів також організовано внутрішній. Для відведення атмосферних вод з покрівлі будівлі встановлено 11 водостічних воронки, випуски яких запроектовані для підключення до дощової каналізації.

У будівлі застосовуються дерев'яні двері для внутрішніх приміщень. Для в'їзду та виїзду транспорту встановлено розпашні ворота по серії. Для заповнення віконних прорізів використовуються віконні панелі з алюмінієвих профілів з подвійним склінням. Вікна виконані з високоякісного скла, що забезпечує енергетичну ефективність та шумоізоляцію.

1.4 Оздоблення промислової будівлі

Виробничі цехи не потребують виконання внутрішнього оздоблення, оскільки їх функціональне призначення не вимагає декоративного чи захисного облицювання. Внутрішні поверхні залишаються функціональними, без додаткових декоративних елементів, що зменшує витрати на обробку та обслуговування приміщень. Однак у допоміжних та технічних приміщеннях, таких як вентиляційні камери, підсобні приміщення, майстерня, електрощитова, курилка, коридори та тамбури, передбачено базове внутрішнє оздоблення.

Поверхні стін у цих приміщеннях покриваються штукатуркою з подальшим забарвленням водно-дисперсійною фарбою. Це забезпечує не лише естетичний вигляд, але й зручність у догляді за поверхнями. Такий підхід гарантує тривалий термін експлуатації покриттів, а також легкість в обслуговуванні.

Санітарні вузли проектуються з підвищеними вимогами до чистоти та вологостійкості. Для цього стіни облицюються керамічною плиткою на

висоту 2 метри. Це рішення дозволяє забезпечити легке прибирання та підтримку гігієнічних умов у приміщеннях, а також забезпечує тривалу експлуатацію оздоблення.

Зовнішнє оздоблення фасадів виробничої будівлі не передбачене, оскільки зовнішні стіни виконані з сендвіч-панелей. Ці панелі мають декоративно-захисне полімерне покриття, яке не лише виконує конструктивні функції, але й забезпечує сучасний естетичний вигляд фасаду без необхідності додаткової обробки. Рішення дозволяє зменшити витрати на зовнішнє оздоблення, одночасно забезпечуючи стійкість до зовнішніх впливів, таких як атмосферні опади та перепади температур.

1.5 Інженерні мережі

Водопостачання будівлі здійснюється через систему господарсько-питного водопостачання, де розрахунковий напір біля основи стояків складає 24 м вод. ст.. Система подачі води передбачає забезпечення необхідних витрат для питних та господарських потреб, а також для функціонування протипожежної системи.

Гаряче водопостачання організовано від зовнішньої мережі, з розрахунковим натиском 25 м вод. ст. в ґрунтуванні стояків. Це забезпечує подачу гарячої води до всіх точок споживання у будівлі, зокрема для санітарно-побутових та виробничих потреб.

Каналізація будівлі – господарсько-фекальна, яка підключена до міської каналізаційної мережі. Всі стічні води, що утворюються у процесі експлуатації будівлі, направляються через внутрішні каналізаційні мережі до загальної міської системи водовідведення.

Опалення приміщень будівлі здійснюється через водяне секційне опалення. Система опалення однотрубна з використанням радіаторів М-140-АТ або сталевих штампованих РСГ-2. Температура теплоносія в системі складає 70-90 °С, що забезпечує комфортні умови для роботи і

функціонування приміщень. Усі елементи системи опалення відповідають вимогам до енергозбереження та ефективності.

Вентиляція будівлі передбачає як природну, так і штучну систему вентиляції, що забезпечує необхідну кількість припливу і витяжки повітря в усіх виробничих, технічних та адміністративних приміщеннях. Це дозволяє підтримувати оптимальний мікроклімат та запобігати накопиченню шкідливих речовин в приміщеннях.

Електропостачання будівлі класифіковане як II категорія, з напругою 220/380 В. Для освітлення будівлі використовуються лампи ДРЛ, що забезпечують необхідний рівень освітленості з низьким енергоспоживанням.

1.6 Теплотехнічний розрахунок огорожувальних конструкцій

Теплотехнічний розрахунок зовнішніх стін виконано відповідно до кліматичних умов міста Запоріжжя, де розташований проектований об'єкт.

Температура зовнішнього повітря для проектування – мінус 21 °С. Середня температура протягом опалювального періоду складає мінус 0,6 °С, а тривалість опалювального періоду – 166 діб.

Умови експлуатації огорожувальних конструкцій визначено з урахуванням теплового та вологісного режиму приміщень, характерного для будівель, що розташовані в кліматичних умовах Запоріжжя. У зв'язку з цим для об'єкта встановлено нормальний режим експлуатації огорожувальних конструкцій, а також важкий тип конструкцій під час періоду опалення.

Теплотехнічні розрахунки проводились згідно з актуальними стандартами та вимогами ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель». Врахування зазначених умов дозволяє забезпечити необхідний рівень енергозбереження та енергоефективності будівлі, а також відповідність вимогам щодо комфортної температури для експлуатації приміщень під час зимового періоду.

Таким чином, розрахунки виконані з урахуванням мінімальних температурних коливань та максимально можливих тепловтрат. Конструкція стінової сендві-панелі наведена на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Схема стіни до теплотехнічного розрахунку

Для забезпечення нормативного опору теплопередачі огорожувальна конструкція має відповідати відношенню (1.2):

$$R_{q,min} < R_{q,пр} \frac{\text{м}^2 \times \text{С}}{\text{Вт}} \quad (1.2)$$

м. Запоріжжя, де розміщенна будівля, що проектується, відноситься до II кліматичного району. Таким чином, мінімальний опір теплопередачі складає (1.3) згідно табл. 2 ДБН В.2.6-31:2021:

$$R_{qmin} = 2,00 \frac{\text{м}^2 \times \text{С}}{\text{Вт}} \quad (1.3)$$

Приведений (фактичний) опір теплопередачі розраховується за формулою (1.4):

$$R_{q, пр} = \frac{1}{h_{int}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_{ут}}{\lambda_{ут}} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_{ext}}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт} \quad (1.4)$$

де h_{int} – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$;

h_{ext} – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$;

δ_i – товщина i -го шару конструкції, м;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу i -го шару, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$.

В якості утеплювача попередньо задаємося мінераловатними плитами ISOVER товщиною 100 мм.

Підставляємо значення та розраховуємо:

$$R_{q, min} = \frac{1}{23,0} + \frac{0,1}{0,042} + \frac{1}{8,7} = 2,54 \frac{\text{м}^2 \times \text{C}}{\text{Вт}}$$

Оскільки в сендвіч-панелі (рис. 1.1) оцинкована частина (сталева) має незначну товщину, її значеннями можна знехтувати для спрощення розрахунку, оскільки суттєво впливу не мають.

Таким чином, умова (1.2) задовольняється:

$$R_{q, min} = 2,0 \frac{\text{м}^2 \times \text{C}}{\text{Вт}} < R_{q, пр} = 2,54 \frac{\text{м}^2 \times \text{C}}{\text{Вт}}$$

Обираємо товщину утеплювача 100 мм з мінераловатної плити.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ

2.1 Опис прийнятої до розрахунку конструкції

Будівля спроектована з використанням сталевих каркасу, який включає кроквяні ферми з замкнутих профілів квадратного перерізу. Верхній пояс ферм має ухил 1,5%, що забезпечує рівномірний розподіл навантажень і покращує стік води з покрівлі. Як прогони використовуються прокатні швелери, на яких укладається профільований настил для покриття даху.

Ферми виготовлені з труб квадратного перерізу, що забезпечує необхідну міцність і стійкість конструкції. Для забезпечення просторової жорсткості між колонами встановлені металеві зв'язки з прокатних профілів (куточків). Зв'язки розташовуються в поздовжньому прольоті будівлі в осях 8-9 по поздовжніх рядах Г і І, а також у поперечних прольотах будівлі в осях Д-Е по рядах 1 і 4, в осях Б-В по рядах 12/1, 16, 19. Просторова жорсткість покриття забезпечується за рахунок вертикальних і горизонтальних зв'язкових ферм, виконаних з прокатних куточків. Зв'язки встановлюються в торцях прольотів для забезпечення стабільності конструкції.

Для розрахунку кроквяних ферм використовуються замкнуті профілі квадратного перерізу за ДСТУ 8808:2018 Профілі сталеві гнуті і сталь С345 за ДСТУ 8539:2015 Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Загальні технічні умови. Висота ферм на опорі становить 3150 мм, а ухил ферм – 0,015.

Розрахунок ферм проводиться за кількома етапами:

1. Встановлення розрахункової схеми конструкції – визначення взаємодії елементів каркасу та ферм.
2. Збір діючих навантажень – враховуються снігові та вітрові навантаження, а також навантаження від робочих процесів.
3. Підбір перерізів елементів – вибір оптимальних розмірів профілів для забезпечення надійності конструкції.
4. Розробка графічної частини – створення креслень на основі розрахункових результатів.

5. Зроблення висновків – перевірка на відповідність вимогам проекту та нормативних актів.

Висота кроквяних ферм визначається за формулою (2.1):

$$h = h_0 + L \cdot 1000 / 2 \cdot i, \text{ м} \quad (1.2)$$

де h_0 – висота на опорі (3150 мм);

L – довжина прольоту (24 м);

i – ухил (0,015).

В результаті розрахунку висота кроквяної ферми на ковзані буде:

$$h = 3150 + 24 \cdot 1000 / 2 \cdot 0,015 = 3330 \text{ мм.}$$

2.2 Збір навантажень на ферму

Збір навантажень на конструкції будівлі виконано відповідно до вимог нормативів, що регулюють розрахунок статичних та динамічних навантажень. У таблиці наведено дані щодо постійних і тимчасових навантажень, зокрема снігових навантажень та їх коефіцієнтів надійності.

Для кожного виду навантаження розраховуються нормативні та розрахункові навантаження з урахуванням коефіцієнтів надійності.

Збір навантажень проведено в табличному вигляді та наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Збір навантажень на ферму

Вид навантаження	Нормативні навантаження, кН/м ²	Коефіцієнт надійності за навантаженням	Розрахункові навантаження, кН/м ²
1	2	3	4
Постійна:	0,050	1,3	0,065
1 Покрівельний килим: верхній шар-техноеласт нижній шар: техноеласт Євроруберойд			
2 Плита Isover– 30 мм $\gamma=140$ кг/м ³	$0,03 \cdot 1,4 =$ 0,042	1,3	0,055
3 Плита Isover– 60 мм $\gamma=90$ кг/м ³	$0,06 \cdot 0,9 =$ 0,054	1,3	0,070
4 Пароізоляція «Техноеласт»	0,040	1,3	0,050
5 Основа покрівлі - оцинкований профільований лист з полімерним покриттям виробництва	0,630	1,05	0,660
Разом постійна:	0,816		0,900
Тимчасова (снігова)	2,500	1,4	3,500
Повна	3,316		4,400

Нормативні навантаження – це навантаження, визначене відповідно до стандартних нормативних значень для кожного виду матеріалу та конструкцій. Вони використовуються для початкових оцінок.

Коефіцієнт надійності за навантаженням – множник, що коригує нормативне навантаження в залежності від умов експлуатації та можливих варіацій навантаження протягом усього терміну служби будівлі.

Розрахункові навантаження – це фактичні навантаження, які враховуються при остаточному розрахунку конструкцій, з урахуванням коефіцієнтів надійності.

Згідно з результатами, розрахункове постійне навантаження на покрівлю складає $0,900 \text{ кН/м}^2$, а тимчасове снігове навантаження – $3,500 \text{ кН/м}^2$. Загальне повне навантаження складає $4,400 \text{ кН/м}^2$.

2.3 Створення розрахункової схеми

У цьому розділі надається детальний опис розрахункової схеми ферми, яка використовується для аналізу конструкції. Геометрична схема ферми, що використовується в розрахунках, представлена на Рисунку 2.1.

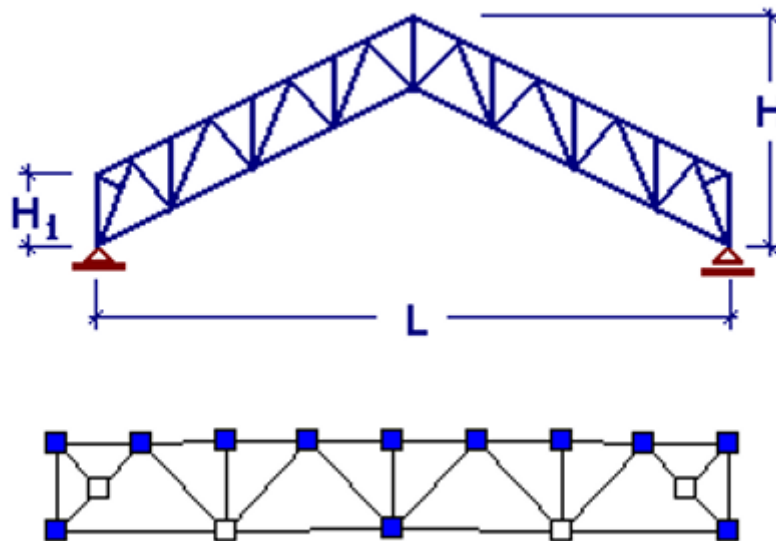


Рисунок 2.1 – Геометрична схема до розрахунку

$L = 24 \text{ м}$; $H = 3.3 \text{ м}$; $H_1 = 3.15$; число панелей нижнього ряду – 4

Ферма є основним несучим елементом конструкції покрівлі будівлі. Вона виконана у вигляді трикутної конструкції, що складається з вертикальних і горизонтальних елементів. Для забезпечення достатньої

жорсткості та стійкості ферми до навантажень, застосовуються кроквяні ферми з замкнутих профілів квадратного перерізу.

Параметри ферми:

- $L = 24$ м – довжина прольоту ферми, що визначає основні розміри конструкції. Цей параметр є ключовим для визначення стійкості та міцності ферми під дією різних навантажень.
- $H = 3,3$ м – висота ферми, що забезпечує її здатність сприймати навантаження та правильно передавати їх на опори.
- $H_1 = 3,15$ м – висота ферми в певній точці конструкції, що дозволяє коректно розрахувати момент і силові навантаження.
- Кількість панелей нижнього ряду – 4 панелі, що визначають кількість елементів у розрахунковій схемі і мають важливе значення для загальної стійкості конструкції.

Конструкція ферми має шарнірне з'єднання на опорах, що дає можливість гнучко реагувати на навантаження, не створюючи великих деформацій. Така схема дозволяє оптимізувати витрати на матеріали та підвищити ефективність використання простору, одночасно забезпечуючи необхідну міцність.

Просторова жорсткість ферми забезпечується використанням вертикальних та горизонтальних зв'язкових елементів. Горизонтальні та вертикальні зв'язки встановлюються в торцях прольотів, що дозволяє правильно розподіляти навантаження та запобігати деформаціям конструкції.

Дана схема ферми була розрахована за допомогою кінцево-елементної моделі, що дозволяє врахувати всі можливі навантаження та деформації, що виникають під час експлуатації будівлі.

2.4 Визначення зусиль в програмному комплексі

Статичний розрахунок конструкцій і підбір перерізів на основі невідгінних поєднань навантажень було виконано за допомогою програмно-

обчислювального комплексу SCAD Structure. Він комплекс дозволяє точно врахувати різні навантаження на конструкції та оптимізувати вибір перерізів для забезпечення необхідної міцності та стійкості всіх елементів будівлі.

Завантаження на конструкцію будівлі були подані у вигляді трьох основних типів навантажень: постійне, тимчасове короткочасне та інше тимчасове короткочасне навантаження. Коефіцієнт надійності за навантаженням для кожного типу навантаження становить 1,1, що відповідає вимогам для забезпечення достатнього запасу міцності конструкцій.

Завантаження для статичного розрахунку представлено на малюнках:

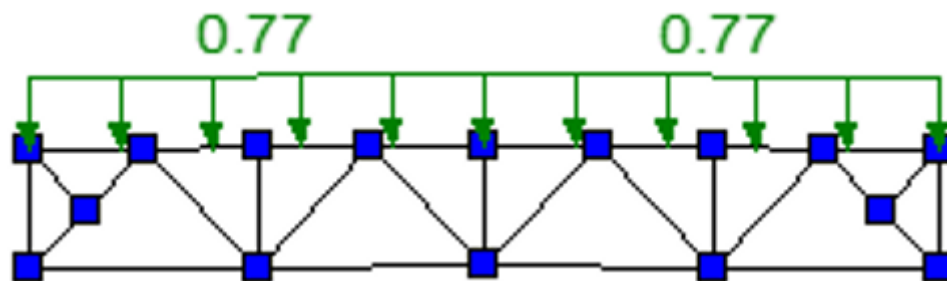


Рисунок 2.2 – Завантаження 1: постійне навантаження, коефіцієнт надійності 1,1.

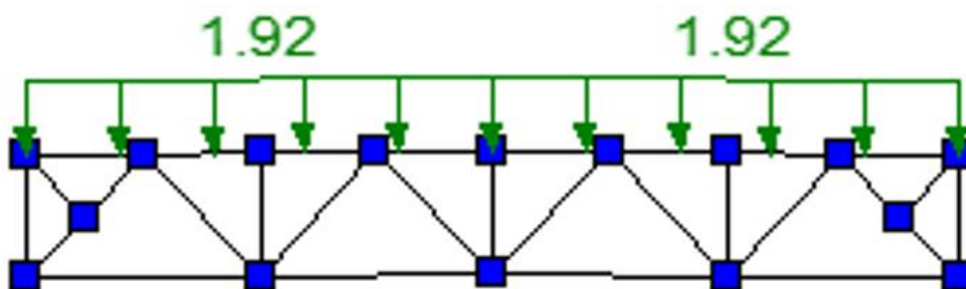


Рисунок 2.3 – Завантаження 2: тимчасове короткочасне навантаження, коефіцієнт надійності 1,1.

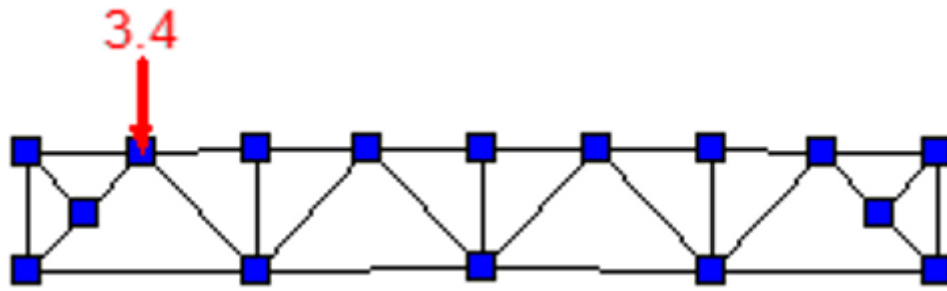


Рисунок 2.4 – Завантаження 3: інше тимчасове короткочасне навантаження, коефіцієнт надійності 1,1.

Також, для зручності візуалізації та перевірки розрахунків, на Рисунок 2.5 наведена нумерація елементів конструкції.

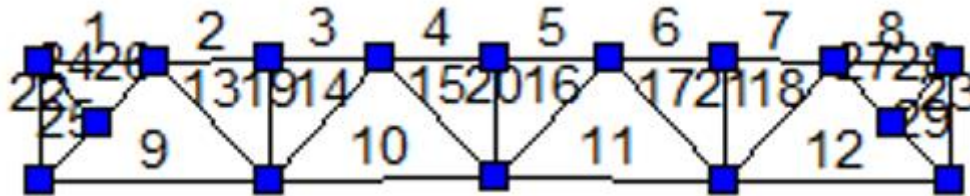


Рисунок 2.5 – Нумерація елементів в програмному комплексі

Вона дає змогу перевірити навантаження на кожен елемент і порівняти їх з допустимими значеннями для подальшого підбору перерізів та матеріалів.

Визначення зусилля наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Внутрішні зусилля в стрижнях ферми

№ елем.	Комбінації	Навантаження	1	2	3
1	$N_{\min} = 1.03e-015$	1.03e-015	1.03e-015	4.118e-015	5.148e-016
2	-46.121	-13.202	-13.202	-32.919	-2.429
3	-46.121	-13.202	-13.202	-32.919	-2.429
4	-61.495	-17.603	-17.603	-43.893	-1.619
5	-61.495	-17.603	-17.603	-43.893	-1.619
6	-46.121	-13.202	-13.202	-32.919	-0.81
7	-46.121	-13.202	-13.202	-32.919	-0.81
8	0	0	0	0	0

9	7.701	27.534	7.701	19.203	2.834
10	16.503	57.652	16.503	41.149	2.024
11	16.503	57.652	16.503	41.149	1.214
12	7.701	26.904	7.701	19.203	0.405
13	7.343	27.689	7.926	19.763	-0.583
14	-16.822	-4.225	-4.815	-12.007	0.591
15	1.002	5.538	1.585	3.953	0.583
16	1.585	5.668	1.585	3.953	0.583
17	-16.822	-4.815	-4.815	-12.007	-0.591
18	7.926	27.689	7.926	19.763	0.583
19	0	0	0	0	0
20	-40.171	-11.236	-11.236	-28.016	-4.134
21	-40.171	-11.236	-11.236	-28.016	-4.134
22	-39.252	-11.236	-11.236	-28.016	-0.591
23	-4.035	-1.155	-1.155	-2.88	0.000005404
24	-4.035	-1.155	-1.155	-2.88	0.000006434
Опорні реакції					
По N_{max}	-9.241	-9.241			
По N_{min}	-32.656	-32.283			

2.5 Розрахунок ферми по несучій здатності

Результати розрахунку несучої здатності конструкцій зведено до таблиці 6, що відображає перевірку всіх елементів будівельної ферми на міцність, стійкість та гнучкість.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку

№ елем.	Перевірка по ДБН	Перевірка
п.5.1	Міцність верхнього пояса	0.734
п.5.3	Стійкість верхнього пояса з площини ферми	0.882
п.5.3	Стійкість верхнього пояса із площини ферми	0.882

п.6.1-6.4,6.16	Гнучкість верхнього пояса	0.372
п.5.1	Міцність нижнього пояса	0.776
п.6.1-6.4,6.16	Гнучкість нижнього пояса	0.864
п.5.1	Міцність стоек	0.542
п.5.3	Стійкість стоек в площині ферми	0.652
п.5.3	Стійкість стоек із площини ферми	0.954
п.6.1-6.4,6.16	Гнучкість стоек	0.738
п.5.1	Міцність розкосів	0.132
п.5.3	Стійкість розкосів в площині ферми	0.555
п.5.3	Стійкість розкосів із площини ферми	0.555
п.6.1-6.4,6.16	Гнучкість розкосів	0.936
	Жорсткість ферми	0.381

Коефіцієнт використання – 0.954 (Стійкість стійок з площини ферми) визначає ефективність використання матеріалів та відповідає стандартам надійності для всіх елементів конструкції. Це показує, наскільки конструкція здатна витримувати навантаження без перевищення граничних значень деформацій або руйнування.

Максимальний прогин – 0.061 м є максимально допустимим прогином конструкції за заданими навантаженнями. Параметр вказує на можливу деформацію елементів конструкції, що важливо для забезпечення довговічності і надійності всієї будівлі.

Специфікація зведена до таблиці 2.4, де подано додаткові деталі та уточнення по кожному елементу.

Таблиця 2.4 – Специфікація сталі на розраховану ферму

Специфікація									
Марка елемента	Деталі	Кількість, шт.	Перетин	Довжина, мм.	Вага, кг.			Марка сталі	Примітка
					Вага однієї деталі	Вага всіх, шт.	Елементи		
Нижній пояс	1	2	140 × 4	11600	200,0	400,0	1725,0	C345	ДСТУ 8808:2018
Верхній пояс	2	2	160 × 4	11600	230,0	460,0		C345	ДСТУ 8808:2018
Розкіс	3	2	100 × 4	1976	24,0	48,0		C345	ДСТУ 8808:2018
	4	2	100 × 4	4146	50,0	100,0		C345	ДСТУ 8808:2018
	5	2	100 × 4	4119	50,0	100,0		C345	ДСТУ 8808:2018
	6	2	100 × 4	4220	51,0	102,0		C345	ДСТУ 8808:2018
	7	2	100 × 4	4170	50,5	101,0		C345	ДСТУ 8808:2018
Стойка	8	2	160 × 4	3320	65,0	130,0		C345	ДСТУ 8808:2018
	9	2	60 × 4	3000	30,0	60,0		C345	ДСТУ 8808:2018
	10	2	60 × 4	3000	30,0	60,0		C345	ДСТУ 8808:2018
Підвіска	11	1	60 × 4	3000	30,0	30,0		C345	ДСТУ 8808:2018
Деталі	12	2	- 200 × 10	400	6,3	12,6		C345	ДСТУ 8540:2015
	13	4	120 × 10	200	1,5	6,0		C345	ДСТУ 8540:2015
	14	4	250 × 10	250	5,0	20,0		C345	ДСТУ 8540:2015
	15	2	250 × 10	600	12,0	24,0		C345	ДСТУ 8540:2015
	16	4	200 × 20	360	12,0	48,0		C345	ДСТУ 8540:2015
	17	2	200 × 10	200	3,0	6,0		C345	ДСТУ 8540:2015
=	Вага зварних швів 1%					17,0		-	-

2.6 Висновки щодо проєктування металеві ферми

У розрахунково-конструктивній частині проєкту було проведено проєктування металеві ферми, яка призначена для сприйняття навантажень від покриття будівлі.

Для цього була розроблена розрахункова схема, що враховує конструктивні особливості ферми та умови її експлуатації в рамках проєкту. Окрему увагу приділено вибору типу і конфігурації ферми, що дозволяє забезпечити її міцність та надійність при виконанні робіт.

У процесі роботи було виконано збір постійних та тимчасових навантажень, включаючи снігове та вітрове навантаження, відповідно до вимог чинних нормативів для проєктування в регіоні, що враховує специфіку кліматичних умов.

На основі отриманих зусиль у елементах ферми були виконані розрахунки на міцність. В результаті цих розрахунків було здійснено підбір оптимальних перерізів для окремих стрижнів конструкції.

Підбір перерізів здійснено з урахуванням економічності та технологічності елементів, що дозволяє досягти необхідної міцності конструкції при мінімальних витратах матеріалів. Одночасно була забезпечена стійкість всієї системи загалом.

Всі отримані результати, включаючи підбір перерізів та матеріалів, зазначено в графічній частині проєкту.

РОЗДІЛ 3. ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Технологічна карта на влаштування траншей під фундаменти

Дана технологічна карта розроблена для виконання комплексу робіт з влаштування траншей під фундаменти будівлі промислового призначення, з проектною глибиною закладення 2,15 метра, а також для зведення самих фундаментів. Усі роботи передбачають виконання стандартних операцій з механізованою розробкою ґрунту, встановленням опалубки та укладанням бетону. Проектом також передбачена організація робіт з урахуванням забезпечення якості та безпеки.

На кресленні 6 графічної частини випускної кваліфікаційної роботи представлена схема розташування фундаментів, згідно з проектними координатами та розбивними осями. Це дає змогу чітко визначити місце для кожного фундаменту на будівельному майданчику, що важливо для правильної організації виконання робіт.

Процес включає такі етапи:

- Попереднє зрізання родючого шару ґрунту для забезпечення підготовки майданчика.
- Механізована розробка ґрунту з використанням екскаваторної техніки.
- Ручна доробка укосів і дна траншей для досягнення необхідної точності.
- Пристрій монолітних залізобетонних фундаментів з дотриманням всіх технологічних вимог.
- Установка фундаментних балок.
- Зворотне засипання та забезпечення стійкості основи.

Усі етапи робіт проводяться відповідно до будівельних норм та правил охорони праці, що забезпечують безпеку і якість виконуваних робіт.

Перед монтажем арматури необхідно:

- Ретельно перевірити відповідність опалубки проектним розмірам та якість її виконання.
- Скласти акт приймання опалубки.

- Підготувати такелажну оснастку, інструменти та електрозварювальну апаратуру.
- Очистити арматуру від іржі.
- Транспортувати арматурні стрижні в пов'язаних пачках, а заставні деталі – у ящиках.
- Арматурні каркаси та сітки кріпляться до транспортних засобів за допомогою поверхневих скруток або розтяжок.

До початку укладання бетонної суміші повинні бути виконані такі роботи:

- Перевірено правильність встановлення арматури та опалубки.
- Усунути всі дефекти опалубки.
- Перевірено наявність фіксаторів, які забезпечують необхідну товщину захисного шару бетону.
- Прийнято за актом усі конструкції та їх елементи, доступ до яких після бетонування неможливий для перевірки.
- Очищено від сміття, бруду та іржі опалубку та арматуру.
- Перевірено роботу всіх механізмів, справність пристроїв, оснащення та інструментів.

Доставка на об'єкт бетонної суміші передбачається автобетонозмішувачем Міксер на базі КАМАЗ. Подача бетонної суміші до місця укладання здійснюється за допомогою автобетононасоса

Ці заходи дозволяють виконати роботу на високому технічному рівні та забезпечити її ефективно та безпечно виконання в процесі будівництва.

3.1.1 Визначення обсягів БМР для технологічної карти

Обсяги будівельних робіт для виконання завдань, наведених в технологічній карті, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Обсяги робіт для ТК

№	Види робіт	Од. вим.	Кількіс ть
1	2	3	4
1. Земляні роботи			
1	Зрізання рослинного шару	1000 м ²	5,36
2	Розробка ґрунту під виїмку екскаватором у відвал	100 м ³	32,39
3	Розробка під виїмку екскаватором із навантаженням на транспортний засіб	100 м ³	1,60
4	Транспортування ґрунту	100 м ³	1,60
5	Зрізання недобору ґрунту вручну	1 м ³	14,63
6	Зворотне засипання ґрунту бульдозером	100 м ³	32,39
7	Пошарове трамбування ґрунту	100 м ²	161,95
2. Влаштування фундаментів			
8	Установка дерев'яної опалубки фундаментів уз готових елементів, поверхні фундаменту, що стикається з бетоном.	1 м ²	760,50
9	Розробка дерев'яної опалубки фундаментів уз готових елементів, поверхні фундаменту, що стикається з бетоном.	1 м ²	760,50
10	Встановлення арматурних сіток та каркасів вручну	1 т	62,40
11	Монтаж бетоноводу	м	50,00
12	Розбирання бетоноводу	м	50,00
13	Подача бетонної суміші бетононасосом 10 м ³ /год	100 м ³	1,60
14	Укладання бетонної суміші в конструкції	1 м ³	160,00
15	Установка фундаментних балок масою до 3 т	1 шт	42,00
16	Фарбувальна вертикальна гідроізоляція	100 м ²	1,01
17	Обклеювальна горизонтальна гідроізоляція	100 м ²	0,15

3.1.2 Виконання основних технологічних операцій

Земляні роботи повинні виконуватись після проведення підготовчих робіт, розбивки осей споруди та визначення меж розробки котловану. Процес починається з механізованої розробки ґрунту за допомогою екскаватора ЕК-18, що дозволяє ефективно виконати основні роботи з копання і зменшити час підготовки ділянки. Після цього, ґрунт вивозиться або складається на будівельному майданчику в залежності від потреб.

Розробка ґрунту проводиться у два етапи: перший – це основне копання котловану, другий – ручний добір ґрунту до проектної позначки. Ручне добирання ґрунту важливе для досягнення необхідної точності та підготовки основи для фундаменту. Після завершення розробки ґрунту виконується бетонна підготовка товщиною 100 мм, що є основою для подальшого влаштування фундаменту.

При виконанні робіт з влаштування опалубки особлива увага приділяється перевірці її відповідності проектним розмірам та якості виготовлення. Для цього перед укладанням бетону проводиться детальна перевірка всіх елементів опалубки, підготовки арматури та забезпечення її стійкості до навантажень. Всі компоненти, включаючи такелажну оснастку та інструменти, повинні бути готові до використання, а арматура – очищена від іржі.

Перед укладанням бетонної суміші необхідно перевірити правильність встановлення арматури та опалубки, усунути всі дефекти та переконатися, що всі фіксатори, що забезпечують захисний шар бетону, встановлені правильно. Також проводиться приймання за актом конструкцій, що недоступні для перевірки після бетонування. Арматурні стрижні транспортуються пов'язаними в пачках, а заставні деталі – у ящиках. Монтаж і з'єднання арматури відбувається відповідно до проекту, зокрема через скріплення стрижнів до опалубки через отвори в дерев'яних рейках.

Після завершення всіх підготовчих робіт починається подача бетонної суміші до місця укладання, що здійснюється за допомогою автобетононасоса АБН-21. Бетон укладається шарами, кожен з яких ущільнюється глибинними вібраторами. Для забезпечення надійності конструкції та запобігання утворенню пор в бетоні вібратор занурюється на глибину 5-10 см в кожен новий шар. Протягом процесу бетонування важливо забезпечити, щоб перерви між шарами не перевищували 40 хвилин.

Після укладання та ущільнення бетону важливо забезпечити його правильний догляд. Це включає в себе захист бетонних поверхонь від втрат вологи, поливання їх водою або укриття вологими матеріалами. Всі роботи з бетонування здійснюються відповідно до чинних нормативів та вимог щодо забезпечення міцності бетону в процесі набору міцності.

Демонтаж опалубки проводиться тільки після досягнення бетоном необхідної міцності, що гарантує збереження його поверхні. Опалубка знімається за допомогою спеціальних домкратів і кріпильних пристроїв, а також при використанні крану для переміщення великих елементів. Всі роботи з демонтажу повинні проводитись в умовах, що забезпечують безпеку для персоналу та збереження вже бетонованих частин конструкцій.

Після монтажу і демонтажу опалубки проводиться приймання за актом виконаних робіт, де перевіряється геометрична точність і надійність кріплень, а також відсутність дефектів, таких як щілини або перекоси, що можуть вплинути на якість конструкції.

Арматурні стрижні, що надійшли на будівельний майданчик, зберігаються на стелажах у закритих складах, сортуються за марками, діаметрами та довжинами. Плоскі та просторові каркаси, масою до 50 кг, подаються до місця монтажу краном у пачках і встановлюються вручну. Окремі стрижні подаються до місця монтажу пучками, сітки – за допомогою траверси по три штуки.

У процесі виконання арматурних робіт спочатку укладають нижні сітки на фіксатори, що забезпечують захисний шар бетону. Потім укладаються

армокаркаси, після чого встановлюються верхні сітки на каркаси. Для кріплення арматури до опалубки використовується дрiт, а стикування каркасiв здiйснюється за допомогою зварювання.

3.2 Розрахунок крану для виконання БМР

Кран забезпечує доставку на будiвельний майданчик таких вантажiв:

- сiток арматури для пiдготовки фундаменту;
- щитiв для конструювання опалубки.

Для подачi укрупнених щитiв опалубки та арматурних сiток використовується кран, обладнаний чотиригiллявим стропом, що дозволяє ефективно i безпечно пiднимати та перемiщувати важкi елементи конструкцiй, що забезпечує їх швидке доставлення до робочих мiсць.

Строп канатний 4СК – чотиригалузевий павук сталевий, що використовується для пiдйому та перемiщення вантажiв на майданчику. Кран, оснащений таким стропом, має вантажопiдйомнiсть 5 т i забезпечує надiйне захоплення вантажу, зменшуючи ризик аварiй пiд час транспортування.

Для забезпечення виконання монтажних робiт на будiвельному майданчику, необхідно правильно вибрати параметри крана, якi повиннi вiдповiдати специфiчним вимогам до вантажопiдйомностi, висоти пiдйому та вильоту стрiли. Цi параметри визначаються за допомогою розрахункiв, якi враховують характеристики конструкцiй, що монтується, а також вимоги до безпеки пiд час виконання робiт.

Для розрахунку параметрiв крана використовуються наступнi основнi величини:

Необхiдна висота пiдйому крана ($H_{\text{стр}}^{\text{необ}}$) визначається за формулою (3.1):

$$H_{\text{стр}}^{\text{необ}} = h_3 + h_э + h_{\text{стр}} + h_n, \text{ м} \quad (3.1)$$

де: $h_3 = 0,5$ м – запас по висоті за умовами безпеки між відміткою установки крана та низом елемента, що піднімається;

$h_{ел}$ – висота елемента, що монтується;

$h_{стр} = 4,5$ м – висота стропування в робочому положенні від верхнього краю елемента;

$h_n = 1,5$ м – висота поліспасти в стягнутому стані.

$$H_{стр} = 0,45 + 0,5 + 4,5 + 1,5 = 6,95 \text{ м}$$

Необхідний виліт стріли крана ($l_{стр}^{необх}$) визначається за формулою (3.2):

$$l_{стр}^{необх} = a + v + B + A, \text{ м} \quad (3.2)$$

де: a – половина ширини фундаменту;

$v = 0,8$ м – за умовами безпеки;

B – закладення укусу;

$A = 2$ м – відстань між краном та брівкою котловану.

$$l_{стр} = 0,2 + 0,8 + 1,45 + 2 + 0,24 = 4,69 \text{ м}$$

Розрахунок дає результат $l_{стр} = 4,69$ м. Необхідна довжина стріли крана ($L_{стр}^{необ}$) визначається за формулою (3.3):

$$L_{стр} = \sqrt{H_{стр}^2 + l_{стр}^2}, \text{ м} \quad (3.3)$$

$$L_{стр} = \sqrt{6,95^2 + 4,69^2} = 8,4 \text{ м}$$

Необхідна вантажопідйомність крана (Q) визначається як сума величин:

$$Q = 1,6 + 0,046 = 1,646 \text{ т}$$

Також для розрахунку необхідних параметрів крану скористуємось графічним методом (рис. 3.1).

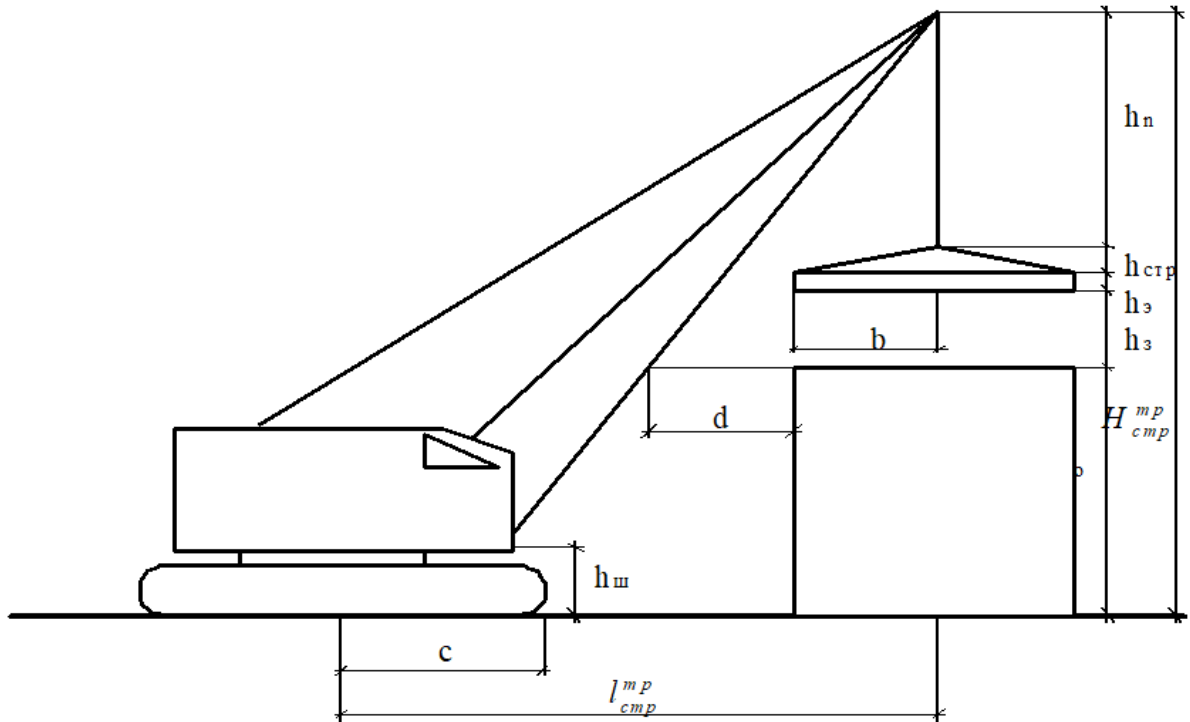


Рисунок 3.1 – Вибір параметрів крану графічним методом

Результати розрахунку крану були проаналізовані та занесені до табл. 3.2 з метою впорядкування та проведення оптимального вибору крану для здійснення БМР.

Таблиця 3.2 – Необхідні параметри крану

Монтовані елементи	Необхідні параметри крану			
	Q	$H_{стр}^{тп}$	$l_{стр}^{тп}$	$L_{стр}^{тп}$
1	2	3	4	5
Колона	0,835	13,9	3,04	12,44
Ферма	6,056	17,15	4,14	17,03
Прогін	0,234	17,45	11,38	18,50

На основі цих розрахунків було визначено, що для монтажу підземних конструкцій підходить кран МКА-16 з довжиною стріли 15 м, що відповідає необхідним параметрам. Для надземних робіт обрано кран МКГ-25 з довжиною стріли 22,5 м, що також задовольняє вимоги проекту.

Вантажопідйомна характеристика крану МКА-16 представлена на рис. 3.2, а характеристика крана МКГ-25 – на рис. 3.3.

Вибір крана відповідно до цих параметрів гарантує надійність та безпеку при виконанні монтажних робіт, враховуючи необхідні вимоги до вантажопідйомності та габаритів.

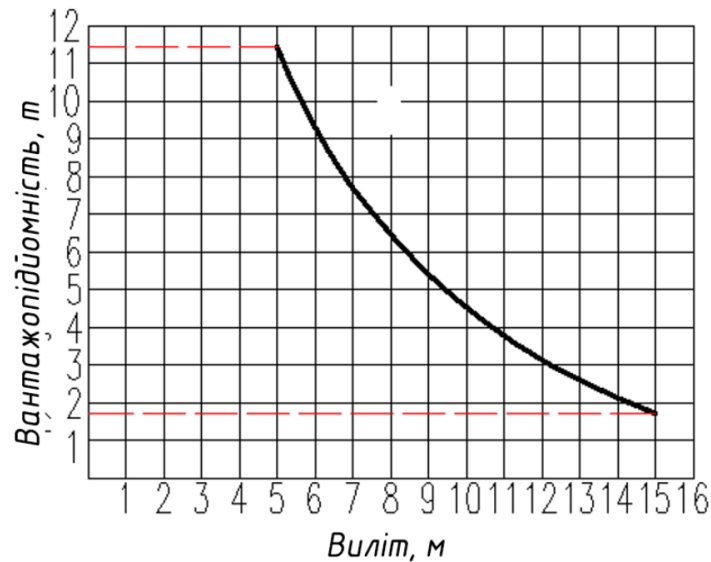


Рисунок 3.2 – Характеристики крана МКА-16



Рисунок 3.3 – Характеристики крана МКГ-25

Параметри підтверджують, що обрані крани відповідають вимогам проекту щодо вантажопідйомності та висоти підйому для виконання монтажних робіт як для підземних, так і для надземних конструкцій.

3.3 Календарне планування будівельного виробництва

У графічній частині проекту здійснюється розробка календарного плану та графіка руху робочої сили. Для побудови календарного графіка необхідно визначити тривалість виконання кожної окремої роботи.

Враховуються різні аспекти, такі як складність завдань, доступність ресурсів, а також можливі ризики, які можуть вплинути на терміни виконання. Тільки після повного врахування цих чинників формується календарний план, який визначає чіткий порядок виконання робіт, що у свою чергу сприяє досягненню високої ефективності будівельного процесу.

Одним із основних етапів є визначення трудовитрат для кожної операції та підрахунок кількості робітників, необхідних для виконання певних етапів будівництва. Для цього застосовується формула (3.4):

$$T = \frac{T_p}{n \cdot k}, \text{чол} - \text{дн} \quad (3.4)$$

де T_x – трудовитрати (чол-дн), що витрачаються на виконання конкретної операції;

n – кількість робітників у ланці;

k – змінність (кількість робочих змін за добу).

Розрахунок допомагає оптимізувати розподіл робочої сили та ресурсів на об'єкті. Тривалість кожної роботи в календарному графіку має бути кратною 1 дню, щоб забезпечити точність і чіткість у плануванні робіт. У результаті цього розрахунку формується календарний план, який вказує на

конкретні терміни виконання кожного виду робіт, а також дозволяє знизити ймовірність затримок.

Загальна тривалість будівництва повинна перевищувати нормативний термін, визначений за вимогами ДСТУ Б А.3.1-22:2013 Визначення тривалості будівництва об'єктів.

Після побудови календарного графіка та оптимізації графіка руху робітників, розраховується коефіцієнт рівномірності потоку за кількістю робітників:

$$\alpha = \frac{R_{cp}}{R_{max}} \quad (3.5)$$

де R_{cp} – середня кількість робітників на об'єкті, що визначається за формулою (3.6):

$$R_{cp} = \frac{\Sigma T_p}{T_{zag}}, \text{чол} \quad (3.6)$$

де: ΣT_p – сумарна трудомісткість всіх робіт з урахуванням додаткових не врахованих робіт;

T_{zag} – загальний термін будівництва за графіком.

$$R_{cp} = \frac{1670}{148} = 11 \text{ чол}$$

R_{max} – максимальна кількість робітників на об'єкті.

Коефіцієнт рівномірності потоку робітників (3.7):

$$\alpha = \frac{11}{18} = 0,61$$

Коефіцієнт дозволяє оцінити рівномірність використання робочої сили в процесі будівництва та визначити ефективність планування робочих змін.

Чим ближче значення α до 1, тим рівномірніше розподілені трудові ресурси протягом усього будівельного процесу.

3.4 Проектування будівельного генплану

3.4.1 Розрахунок площ складів

Для того щоб правильно розрахувати необхідну площу складських приміщень та ефективно розмістити їх на генеральному плані будівництва, необхідно насамперед визначити обсяг запасів матеріалів, що зберігаються. Спочатку слід провести аналіз типів матеріалів, які будуть зберігатися на складі.

Після визначення типів матеріалів важливо оцінити обсяг кожного з них, що дозволить отримати точне уявлення про необхідний простір для їх зберігання. Наприклад, для зберігання цегли потрібно більше місця, ніж для арматури чи інструментів. Зокрема, матеріали, що потребують певних умов зберігання (вологість, температура, захист від механічних пошкоджень), мають вимоги до організації складських приміщень.

Після цього можна приступати до розрахунку площі складів. Враховуються додаткові фактори, такі як необхідність у проходах для зручного доступу до матеріалів, а також вимоги до умов зберігання матеріалів. Це важливо для забезпечення ефективної роботи складів та забезпечення швидкого доступу до необхідних ресурсів.

Запас матеріалу визначається за формулою (3.7):

$$Q_{\text{зап}} = \frac{Q_{\text{заг}}}{T} \cdot n \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (3.7)$$

де $Q_{\text{заг}}$ – загальна кількість матеріалу цього виду;

T – тривалість робіт із використанням цих матеріалів;

n – норма запасу (приблизно 1–5 днів);

k_1 – коефіцієнт нерівномірності надходження матеріалів ($k_1 = 1,1$);

k_2 – коефіцієнт нерівномірності споживання матеріалів ($k_2 = 1,3$).

Після визначення запасу матеріалу, розраховується корисна площа складу для кожного виду матеріалу. Формула для цього (3.8):

$$F_{\text{під}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{q}, \text{ м}^2 \quad (3.8)$$

де q – норма складування матеріалу, яка визначає, скільки матеріалу можна розмістити на 1 м² складу.

Загальна площа складу з урахуванням проходів та проїздів визначається за формулою (3.9):

$$F_{\text{заг}} = F_{\text{під}} \cdot K_{\text{вик}}, \text{ м}^2 \quad (3.9)$$

де $K_{\text{заг}}$ – коефіцієнт, що враховує додаткову площу для проходів і проїздів між стелажми та матеріалами.

Розрахунки допомагають визначити точну площу складу, що необхідна для зберігання різних типів матеріалів, а також організувати рух вантажів, забезпечивши швидкий доступ до необхідних ресурсів і ефективну роботу складів на будівельному майданчику.

Загальний розрахунок площі складських приміщень наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Визначення площі складів

Найменування матеріалів та конструкцій	Тривалість в днях	Потреба у тонах		Коефіцієнт нерівномірності		Розрах. запас	Од. вим	Площа складу, м ²	
		загалом	на добу	на д.	вик.			Розрах	Факт БГП
1	2	4	5	6	7	9	10	13	14
Ферми	22,00	80,0	3,64	1,1	1,3	52,05	т/м ²	189,2	132,5
Колони	22,00	48,4	2,20	1,1	1,3	31,46	т/м ²	114,4	80,08
Прогони	22,00	38,6	1,75	1,1	1,3	25,09	т/м ²	43,01	30,11
Проф. лист	22,00	18,5	0,48	1,1	1,3	12,03	т/м ²	2061	14,43

3.4.2 Визначення площ тимчасових будівель та споруд

Визначення площ тимчасових будівель та споруд проводиться з урахуванням максимальної чисельності працюючих на будівельному майданчику та нормативної площі на одну особу, яка користується цими приміщеннями. Такий підхід дозволяє коректно визначити необхідну площу для різних видів тимчасових будівель (адміністративних, санітарно-побутових тощо):

Потреба в тимчасових адміністративних та санітарно-побутових будинках визначається з розрахунку чисельності персоналу будівництва.

При цьому приймається, що ІТП (інженерно-технічний персонал) та службовці становлять 10% від чисельності робітників, а молодший обслуговуючий персонал (МОП) та пожежно-сторожова охорона – 2%.

Оцінка кількості робітників на першу зміну передбачає, що орієнтовно 70% від загальної кількості персоналу працюють у першу зміну, а для інших категорій – 80%.

Комплекс тимчасових будівель розраховується на основі розрахункової чисельності робітників, які працюють у найбільш чисельну зміну, що дає змогу правильно визначити необхідну площу для кожного типу приміщення.

Чисельність робітників на найбільш числену зміну (3.10):

$$N_p = N_{max} \times 21 \text{ чол} \quad (3.10)$$

Чисельність адміністративного персоналу:

$$N_c = 0,12 \times 21 = 3 \text{ чол}$$

Значення використовуються для визначення загальної площі тимчасових будівель на майданчику, враховуючи нормативні площі, які мають бути надані кожному працівнику відповідно до вимог будівельних норм.

Таблиця 3.4 – Розрахунок площі тимчасових санітарно-побутових приміщень

Санітарно-побутові приміщення				
Найменування	Призначення	Одиниця виміру	Норм показник	Необхід площа
1	2	3	4	5
Вбиральня	Перевдягання та зберігання вуличного одягу	м ² , подвійна шафа	0,9 на 1 чол. 1 на 1 чол.	18,9
Приміщення для зігрівання	Зігрівання, відпочинок та прийом їжі	м ²	1 на 1 чол.	21
Умивальна	Санітарно-гігієнічне обслуговування робітників	м ² , кран	0,05 на 1 чол. 1 на 15 чол.	1,2
Приміщення для особистої гігієни жінок	Те саме	м ² , кабіна	0,18 на 1 чол. 1 на 15 чол.- 100 чол.	4,32
Душева	...	м ² , сітка	0,43 на 1 чол. 1 на 12 чол.	10,32
Туалет	...	м ² , місце	0,07 на 1 чол. 1 на 20 дружин, 1 на 25-30 чоловік	1,68
Їдальня (буфет)	Забезпечення робітників гарячим харчуванням	м ² , посадкове місце	0,6 на 1 чол. 1 на 4 чол.	14,4

3.4.3 Розрахунок потреби у водопостачанні

Водопостачання будівництва має здійснюватися з урахуванням діючих систем водопостачання. При влаштуванні мереж тимчасового водопостачання необхідно спочатку прокласти та використовувати мережі запроєктованого постійного водопроводу, що забезпечить стабільність водопостачання на майданчику.

Під час проектування тимчасового водопостачання важливо правильно визначити схему розташування водопровідних мереж та діаметр трубопроводів, які подають воду.

Загальна витрата води на будівельному майданчику визначається за формулою (3.11):

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{вир}} + Q_{\text{госп}} + Q_{\text{пож}}, \frac{\text{л}}{\text{с}} \quad (3.11)$$

де $Q_{\text{вир}}$ – потреба у воді на виробничі потреби;

$Q_{\text{госп}}$ – витрати води на господарсько-побутові потреби;

$Q_{\text{пож}}$ – витрати води на протипожежні потреби.

Потреба у воді на виробничі потреби визначається за формулою (3.12):

$$Q_{\text{пр}} = \sum \frac{(q_1 \cdot n \cdot K_n)}{8 \cdot 3600}, \frac{\text{л}}{\text{с}} \quad (3.12)$$

де q_1 – орієнтовна норма води на одиницю роботи, л;

n – кількість одиниць робітників або одиниць техніки, що споживають воду;

K_n – коефіцієнт нерівномірності водоспоживання;

$$Q_{\text{заг}} = 0,37 + 1 + 10 = 11,37 \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

Результат розрахунку витрати води наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Розрахунок води на виробничі потреби

Вид будівельно-монтажних робіт	Од. вим.	Орієнтовна норма, л	Обсяг за зміну	K_H
1	2	3	4	5
Приготування розчинів	м ³	330	4	1,5
Приготування бетону	м ³	250	3	1,5
Полив бетону	м ³	1000	2	1,5
Штукатурка при готовому розчині	м ²	5	12	1,5
Миття автомашин	шт/см	750	4	1,5

Потрібний діаметр водопроводу для забезпечення належного водопостачання розраховується за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{заг}} \cdot 1000}{\pi \cdot v}}, \text{ мм} \quad (3.13)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 11,37 \cdot 1000}{3,14 \cdot 1,5}} = 92,2 \text{ мм.}$$

де v – швидкість руху води в трубопроводі (прийнята рівною 1,5 м/с для стандартних умов).

Розрахований діаметр водопроводу становить 92,2 мм.

Оскільки на майданчику необхідна більш надійна система водопостачання, приймаємо діаметр водопроводу 100 мм, що забезпечить необхідний запас для ефективної роботи водопостачання на будівельному майданчику, з урахуванням змінних навантажень на систему в залежності від стадії будівництва та потреби в воді.

3.4.4 Визначення необхідної потужності для проведення БМР

Основним видом енергії, що використовується на будівництві, є електроенергія, яка споживається на зовнішнє освітлення доріг, проїздів, робочих місць, внутрішнє освітлення будівель, складських і підсобних приміщень, а також на обслуговування та експлуатацію будівельних машин і механізмів. Крім того, електроенергія використовується для задоволення виробничо-технічних потреб, таких як електропрогрівання.

Розрахунок потреби в електроенергії для будівельного майданчика здійснюється на основі таких вихідних даних, як перелік робіт, терміни їх виконання, перелік будівельних машин та механізмів, терміни їх роботи, а також площа території будівництва і кількість робочих змін.

Основні етапи проектування тимчасового енергопостачання включають:

1. Визначення споживачів електроенергії.
2. Встановлення витрат електроенергії по споживачах.
3. Уточнення джерела енергопостачання.
4. Визначення схеми електропостачання.

Розрахунок енергопостачання починається з визначення періоду, коли будівництво споживатиме електроенергію, після чого встановлюється номенклатура споживачів. Споживачів зручніше поділити на такі групи:

- Виробничі – живлення електродвигунів будівельних машин, механізмів та електрифікованого інструменту;
- Технологічні – підігрів будівельних матеріалів, електрозварювання, сушіння тощо;
- Внутрішнє електроосвітлення тимчасових будівель і складів;
- Зовнішнє електроосвітлення під час виконання монтажних, земляних, бетонних робіт;
- Аварійне та охоронне освітлення.

Для розрахунку потужності трансформатора, що буде забезпечувати електроенергією майданчик, використовується наступна формула:

$$P_p = 1,1 \cdot \left(\sum (P_c \cdot K_c / \cos \varphi) + \sum (P_m \cdot K_m / \cos \varphi) + \sum P_{o.v.} \cdot K_{o.v.} + \sum P_{o.z.} \right), \text{ кВт} \quad (3.14)$$

де $\sum(P_c \times K_c / \cos\varphi)$ – потужність будівельних машин;

$\sum(P_m \times K_m / \cos\varphi)$ – потужність технологічних процесів;

$\sum(P_{o.v.} \times K_{o.v.})$ – потужність освітлення внутрішніх приміщень;

$\sum(P_{o.z.})$ – потужність зовнішнього освітлення.

Відомість споживачів електроенергії представлена в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 - Потужності машин, механізмів та пристроїв

Споживачі	P	$\cos \varphi$	K
1	2	3	4
Кран гусеничний	50	0,5	0,7
Штукатурна станція	10	0,85	0,5
Малярна станція	6	0,85	0,5
Зварювальне обладнання	20	0,85	0,5
Електроінструмент	5	0,85	0,5
Висвітлення внутрішніх приміщень	4	1	0,8
Зовнішнє освітлення	10,5	1	1

Розрахункова потужність трансформатора для цього об'єкта становить:

$$P_p = 164 \text{ кВт.}$$

Для забезпечення енергопостачання будівельного майданчика було обрано трансформаторну підстанцію СКТП – 1СО – 10/6/0,4 потужністю 180 кВА.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ В БУДІВНИЦТВІ

4.1 Ідентифікація професійних ризиків

Під час виконання будівельно-монтажних, підготовчих та експлуатаційних робіт на об'єкті на працівників діє комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Вони зумовлені використанням будівельної техніки, машин і механізмів, електроінструменту, виконанням робіт на відкритому повітрі, а також впливом фізичних факторів виробничого середовища.

Ідентифікація професійних ризиків виконана шляхом аналізу технологічних процесів і умов праці на різних етапах життєвого циклу об'єкта: підготовчих робіт, будівництва та експлуатації. При цьому враховувалися можливі джерела небезпеки, причини їх виникнення, основні параметри дії небезпечних факторів, тривалість їх впливу та ймовірні наслідки для здоров'я і життя працівників.

Проведена ідентифікація професійних ризиків свідчить, що найбільшу небезпеку для працівників становлять рухомі машини і механізми, електричні та механічні фактори, а також несприятливі фізичні умови робочого середовища. Отримані результати є основою для подальшої розробки заходів з охорони праці, спрямованих на зниження рівня професійних ризиків і забезпечення безпечних умов праці на будівельному об'єкті.

Аналіз небезпек виконано в табличному вигляді та наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Ідентифікація основних виробничих небезпек

Небезпечні та шкідливі фактори	Джерело	Можливі причини	Час існування небезпеки	Можливі наслідки
Підготовчі роботи				
Машини, що рухаються, і механізми	Будівельна техніка (бульдозер)	Кінетична енергія при контрольованому та неконтрольованому русі	8 год	Защемлення, роздавлювання, порізи, відрізання, захоплення, намотування
Будівництво об'єкта				
Машини, що рухаються, і механізми	Автомобільний кран	Кінетична енергія рухомих частин	8 год	Потрапляння під удар
Механічні небезпеки	Машини та механізми (електродриль, фарбопульт, зварювальний апарат)	Відсутність захисних кожухів, захаращеність робочого місця, слизька підлога, падіння предметів	Постійно	Защемлення, порізи, відрізання, захоплення, намотування, удари

Підвищений рівень шуму	Устаткування	Робота машин і механізмів	Постійно	Порушення слуху, стомлюваність, стрес, зниження уваги
Підвищена запиленість і загазованість повітря	Оздоблювальні, зварювальні, антикорозійні роботи	Відсутність або недостатність засобів захисту	8 год	Подразнення дихальних шляхів, травмування пилом і газами
Електрична небезпека	Струмопровідні частини обладнання	Недотримання правил електробезпеки	8 год	Ураження електричним струмом, летальні наслідки
Теплові небезпеки	Робоче середовище	Робота на відкритому повітрі або з високими температурами	8 год	Перегрів, переохолодження, опіки, обмороження
Експлуатація об'єкта				
Руйнування конструкцій	Несучі конструкції (фундаменти, колони, покриття)	Потенційна енергія рідини або елементів під навантаженням	Постійно	Защемлення, роздавлювання, удари, травмування

4.2 Заходи щодо безпечних умов праці

З метою забезпечення безпечних умов праці під час виконання будівельно-монтажних робіт на об'єкті передбачено комплекс організаційних, технічних та індивідуальних заходів, спрямованих на зниження рівня професійних ризиків, раніше ідентифікованих у процесі аналізу небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Безпека працівників під час виконання робіт на висоті досягається шляхом застосування страхувальних систем, обмеження доступу до зон перепаду висот і використання засобів індивідуального захисту. Робочі місця організуються таким чином, щоб мінімізувати ймовірність падіння працівників або матеріалів.



Рисунок 4.1 – Безпека роботи на висоті зі страхувальним тросом

Для запобігання травмуванню рухомими машинами і механізмами передбачено виділення небезпечних зон, які не перетинаються з маршрутами переміщення працівників, а також чітке розмежування транспортних і пішохідних потоків. Усі машини та механізми допускаються до експлуатації лише за умови справного технічного стану та відсутності пошкоджених або незахищених рухомих елементів.

Електробезпека забезпечується шляхом регулярної перевірки електроінструменту й обладнання перед початком роботи, недопущення використання несправних кабелів і з'єднань, а також застосування відповідних засобів індивідуального захисту. Працівники допускаються до виконання електротехнічних робіт лише після відповідного інструктажу.

Для запобігання мимовільному обваленню будівельних конструкцій і риштування здійснюється постійний візуальний контроль їхнього технічного стану. У разі виявлення дефектів або нестійкого положення конструкцій роботи негайно припиняються до усунення небезпеки.



Рисунок 4.2 – Засоби ЗІЗ на будівництві

Зменшення ризиків, пов'язаних із падінням матеріалів і вантажів, досягається шляхом контролю надійності стропування, заборони перебування працівників у зоні переміщення вантажів та дотримання безпечних відстаней під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій.

При роботі з елементами, що мають гострі кромки або кути, здійснюється попередній огляд конструкцій і застосовуються захисні рукавиці та спецодяг. За необхідності використовуються додаткові захисні накладки або технологічні прийоми, що знижують ризик порізів і травм.

Захист працівників від підвищеної запиленості та наявності шкідливих речовин у повітрі забезпечується обмеженням часу перебування в небезпечній зоні, застосуванням засобів індивідуального захисту органів дихання та організацією заходів щодо зменшення утворення пилу і газів.

При виконанні робіт за умов підвищених або знижених температур дотримуються безпечні режими праці та відпочинку, а також використовуються відповідні засоби захисту рук і спеціальний одяг. Це дозволяє знизити ризик перегріву, переохолодження, опіків або обмороження.

Для зменшення негативного впливу шуму та вібрації організовуються регламентовані перерви у роботі, а також застосовуються індивідуальні засоби захисту слуху і рук. Комплексне впровадження зазначених заходів сприяє створенню безпечних умов праці, зниженню рівня професійних ризиків та запобіганню виробничому травматизму на будівельному майданчику.

4.3 Пожежна безпека будівельного майданчику

Пожежна безпека є однією з ключових складових загальної системи безпеки під час виконання будівельно-монтажних і виробничих робіт, особливо на об'єктах, де застосовуються зварювальні процеси, електроінструмент, вантажопідіймальні механізми та тимчасові електричні мережі. Пожежі на таких об'єктах можуть призводити не лише до матеріальних збитків, але й до тяжких наслідків для життя та здоров'я людей, а також до порушення технологічного процесу.

Потенційна пожежна небезпека на об'єкті зумовлена наявністю джерел займання у вигляді відкритого полум'я, іскор, нагрітих поверхонь обладнання, а також можливістю короткого замикання електричних ланцюгів. Особливу небезпеку становлять зварювальні роботи та експлуатація електроінструменту, під час яких виникає поєднання теплового впливу, електричної енергії та горючих матеріалів. Супутніми небезпечними факторами пожежі є інтенсивне теплове випромінювання, задимлення, утворення токсичних продуктів горіння, а

також можливість вибухоподібного розвитку пожежі у разі наявності горючих або легкозаймистих речовин.

З метою запобігання виникненню пожеж на об'єкті передбачено комплекс технічних заходів, спрямованих на раннє виявлення та локалізацію осередків займання. До них належить забезпечення робочих зон первинними засобами пожежогасіння, що дозволяють оперативно реагувати на початковій стадії пожежі. У разі розвитку пожежі більших масштабів передбачається можливість використання стаціонарних і мобільних засобів пожежогасіння, а також пожежного інвентарю, призначеного для розбирання конструкцій, прокладання доступу до осередку займання та обмеження поширення вогню.

Важливу роль у системі пожежної безпеки відіграє організація будівельного майданчика та виробничих приміщень. Матеріали, конструкції та відходи виробництва розміщуються з урахуванням мінімізації пожежного навантаження та забезпечення вільних підходів до шляхів евакуації і засобів пожежогасіння. Тимчасові електричні мережі прокладаються таким чином, щоб виключити їх механічне пошкодження, перегрів або контакт з горючими матеріалами. Складування легкозаймистих і вибухонебезпечних речовин на території об'єкта не допускається.

Організаційні заходи пожежної безпеки спрямовані на формування у працівників відповідального ставлення до дотримання протипожежного режиму. Усі працівники, залучені до виконання робіт, проходять інструктаж з пожежної безпеки, у ході якого їх ознайомлюють з можливими джерелами пожежної небезпеки, правилами користування засобами пожежогасіння та порядком дій у разі виникнення пожежі. Особлива увага приділяється працівникам, що виконують зварювальні та інші вогневі роботи.

На території об'єкта встановлюється заборона на розведення відкритого вогню та куріння у невідведених для цього місцях. Контроль за дотриманням цих вимог здійснюється відповідальними особами, призначеними для забезпечення пожежної безпеки. У разі виявлення порушень протипожежного режиму вживаються негайні заходи щодо їх усунення.

Для забезпечення безпеки людей у разі виникнення пожежі передбачено організацію безпечної евакуації. Шляхи евакуації підтримуються у вільному та справному стані, не допускається їх захаращення матеріалами або обладнанням. Працівники інформуються про порядок оповіщення та дії у разі пожежі, включаючи необхідність негайного припинення робіт, відключення електрообладнання за можливості та організований вихід із небезпечної зони.



Рисунок 5.3 – Аналіз небезпеки у контексті пожеж на майданчику

Окрему увагу приділено забезпеченню безпеки об'єкта в умовах надзвичайних ситуацій. Передбачено завчасну підготовку до можливих аварійних сценаріїв, що супроводжуються пожежею, з метою зменшення масштабів ураження та створення умов для оперативного проведення рятувальних і невідкладних аварійно-відновлювальних робіт. Узгоджені дії персоналу в таких ситуаціях дозволяють знизити ризик паніки, мінімізувати втрати та забезпечити ефективну ліквідацію наслідків пожежі.

Таким чином, система пожежної безпеки на об'єкті ґрунтується на поєднанні технічних і організаційних заходів, спрямованих на запобігання виникненню пожеж, обмеження їх розвитку та захист людей у разі надзвичайних ситуацій. Реалізація цих заходів є необхідною умовою безпечного виконання робіт і стабільного функціонування об'єкта протягом усього періоду його експлуатації.

4.4 Пожежна безпека на будівельному майданчику

Проектування електричного освітлення будівельного майданчика здійснюється з урахуванням вимог до безпечного виконання будівельно-монтажних робіт у темний час доби та включає опрацювання таких систем освітлення:

- загального рівномірного освітлення будівельного майданчика під час виконання будівельно-монтажних робіт у темний час доби;
- місцевого робочого освітлення зони виконання будівельно-монтажних робіт;
- охоронного зовнішнього освітлення будівельного майданчика;
- внутрішнього освітлення тимчасових будівель і споруд.

Для забезпечення загального рівномірного освітлення будівельного майданчика застосовуються прожекторні установки. Орієнтовна кількість прожекторів визначається за формулою (5.1):

$$N_{\text{пр}} = \frac{m \cdot E_n \cdot K_{\text{зп}} \cdot S}{P_{\text{л}}}, \quad (1)$$

де $m = 0,16$ Вт/(м²·лк) – коефіцієнт, що враховує світлову віддачу джерел світла та коефіцієнт корисної дії світильників;

$E_n = 2$ лк – нормативна освітленість робочих місць і території будівельного майданчика;

$k_{зп} = 1,5$ – коефіцієнт запасу, що враховує нерівномірність прожекторного освітлення;

$S = 9712 \text{ м}^2$ – площа, що освітлюється (приймається рівною площі будівельного майданчика в межах огороження);

$P_{л} = 1000 \text{ Вт}$ – потужність лампи прожектора.

$$N_{пр} = \frac{0,16 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 9711,6}{1000} = 5 \text{ шт.}$$

Отримане значення є орієнтовним і підлягає уточненню з урахуванням конструктивних обмежень розміщення прожекторів. При розташуванні прожекторів по периметру будівельного майданчика відстань між ними не повинна перевищувати чотирикратної висоти їх підвісу. Для цього периметр огороження будівельного майданчика поділяється на величину $4H$, де H – висота встановлення прожекторів.

У разі якщо кількість прожекторів, визначена з урахуванням цього обмеження, перевищує орієнтовне значення, приймається більше значення. З урахуванням зазначених умов для проєктування системи загального рівномірного освітлення будівельного майданчика приймається:

Для освітлення будівельного майданчику приймаємо 6 прожекторів.

РОЗДІЛ 5. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

5.1 Теоретичні основи використання шлакових в'язучих з ангідридами

Шлакові в'язучі матеріали привертають значну увагу як екологічно дружні альтернативи портландцементу. Доменний гранульований шлак (відходи виробництва чавуну) вже давно використовують як добавку до цементу; наприклад, у Європі шлак входить до складу металоцементів (тип СЕМ ІІІ).

Сучасні дослідження зосереджені на високому заміщенні клінкеру шлаком задля зменшення викидів CO_2 та енергоємності виробництва цементу. Зокрема, у суперсульфатних цементах (SSC) частка портланд-клінкеру знижена приблизно на 90%, а основну масу в'язучого (більш ніж 80 мас.%) складає гранульований доменний шлак з додаванням ~10–20% гіпсу або ангідриту. Такі системи мають дуже низький вміст клінкеру і розглядаються як низьковуглецеві в'язучі нового покоління. Для активації шлаку іноді додають незначну кількість лужних компонентів (наприклад, KOH) замість клінкеру. Основними продуктами гідратації шлакових цементів є гель C-S-H (кальцій-силікат-гідрат) та еттрінгіт, які забезпечують наростання міцності матеріалу.

Іншим перспективним напрямом є лужно-активовані матеріали (ЛІАМ) на основі шлаку, також відомі як геополімерні або шлаколуужні цемента. Такі в'язучі утворюються при змішуванні гранульованого шлаку з лужними компонентами (гідроксид натрію, водне скло тощо).

Шлаколуужні цемента характеризуються високою міцністю, щільністю та стійкістю до корозійних середовищ.

Вони розглядаються як ефективний спосіб утилізації промислових відходів і зниження вуглецевого сліду цементної галузі. За даними сучасних досліджень, лужно-активовані шлакові в'язучі здатні зменшити викиди CO_2

на ~40% у порівнянні з традиційним цементом, демонструючи при цьому високу міцність та низьку проникність.

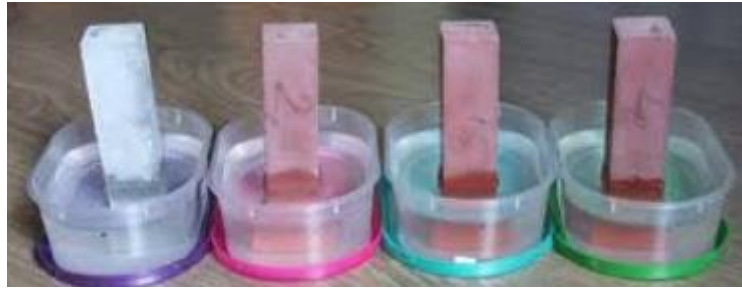


Рисунок 5.1 – Шлаколужні декоративні цементи

Важливо, що такі матеріали вже знаходять практичне застосування: наприклад, шлаколужні цементи використовують не тільки в будівництві, але й для іммобілізації токсичних і радіоактивних відходів (важкі метали, шлами тощо) завдяки їх високій хімічній стійкості prints.kname.edu.ua.

Одним з недоліків шлакових в'язучих є повільніше тверднення на ранніх стадіях у порівнянні з портландцементом.

В сучасних наукових працях приділяється увага прискоренню набору ранньої міцності шлакових систем – зокрема, шляхом введення активуючих добавок (сульфати, луги, нанодомішки) або модифікаторів гідратації (наприклад, органічних прискорювачів). Проте у довгостроковій перспективі шлакові в'язучі демонструють відмінну довговічність – підвищену стійкість до сульфатної корозії, проникнення хлоридів, нижче тепловиділення при твердненні та кращу реологію сумішей.

5.1.1 Класифікація та властивості доменних шлаків. Активування шлакових в'язучих

Доменний шлак – побічний продукт виплавки чавуну – є основною сировиною для шлакових в'язучих. За способом отримання розрізняють

гранульований шлак (розплав швидко охлажують у воді або парі) та повільно охолоджений шлак (затвердіння в отвалі на повітрі).

Лише гранульований шлак, що має склоподібну аморфну структуру, придатний для використання як в'язуче – він характеризується високим вмістом неупорядкованого скла (90–100% при правильному режимі грануляції) і називається металургійним шлаковим цементом після помелу.

При повільному охолодженні шлаковий розплав кристалізується з утворенням мінералів (мервініт, меліліт тощо) і втрачає приховану гідравлічну активність тому такий шлак придатний хіба що як заповнювач, але не як самостійне в'язуче.



Рисунок 5.2 – Зразки гранульованого доменного шлаку: подрібнений (зліва, тонкий порошок – шлакове в'язуче) і гранульований (справа, крупинки перед помелом). Вода швидко охолоджує розплав шлаку, утворюючи аморфне «скло» світло-сірого кольору

Хімічний склад доменного гранульованого шлаку варіює залежно від сировини та режиму виплавки, проте основними оксидами є CaO (~30–50%), SiO_2 (~28–38%), Al_2O_3 (~8–24%) та MgO (~1–18%). Співвідношення базових оксидів ($\text{CaO}+\text{MgO}$) до кислотних ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$) визначає основність шлаку і

пов'язане з його гідравлічною активністю. Загалом більш основні шлаки (з підвищеним вмістом СаО) проявляють вищу міцність при твердненні.

Для оцінки якості шлаку використовують різні гідравлічні модулі (коефіцієнти складу), що корелюють зі здатністю шлаку набирати міцність.

Високоякісний гранульований шлак має достатній вміст СаО, помірний Al_2O_3 (до ~10–14%) і високий вміст аморфної фази.

Подрібнений гранульований шлак сам по собі твердне дуже повільно при змішуванні з водою, оскільки виділяє недостатньо $Ca(OH)_2$ для активації власної гідратації. Тому шлакові в'язучі потребують активування. Основні методи активування шлаку такі:

– Лужне активування. Додавання лужних компонентів (гідроксиди Na, K; силікати лужних металів тощо) різко підвищує рН середовища, сприяючи розчиненню склоподібного шлаку. При цьому шлак переходить у стан, подібний до геополімерного: розчинені іони SiO_4^{4-} , AlO_4^{5-} полімеризуються в лужному середовищі з утворенням геле подібних продуктів (високоосновний кальцій-силікат-гідрот та ін.) і забезпечують швидкий приріст міцності. Шлаколувні цементи саме і отримують спільним помелом шлаку з лугами (наприклад, содою або рідким склом) eprints.kname.edu.ua. Такий підхід дозволяє взагалі не використовувати портландцементний клінкер, що дає значний екологічний ефект. Лужно-активовані шлаки демонструють високу міцність і низьку проникність, однак можуть мати проблему усадки при висиханні, яку намагаються вирішити шляхом модифікації складу лужного активатора (зокрема, додаванням буферних солей, органічних компонентів тощо).

– Активування лужними ґрунтовими продуктами гідратації цементу. Традиційно гранульований шлак вводять до складу портландцементу. При гідратації цементу виділяється гідроксид кальцію ($Ca(OH)_2$), який підвищує рН і «пускає в хід» латентно-активний шлак. Крім того, в самому клінкері містяться лужні оксиди (Na_2O , K_2O) та сульфат кальцію (гіпс), що теж сприяють активації шлаку. Таким чином, у цементно-шлакових композиціях

шлак гідратує спільно з клінкерними фазами. Вже при ранньому тужавінні портландцемент розчиняється з утворенням $\text{Ca}(\text{OH})_2$, забезпечуючи високу лужність середовища для розчинення шлаку mdpi.com. Іони Al^{3+} , Ca^{2+} , Si^{4+} , що вивільняються зі шлаку, взаємодіють із сульфатом кальцію, утворюючи еттрінгіт ($\text{C}_6\text{A}\text{S}_3\text{H}_{32}$) на ранніх етапах, а надалі із залишковим $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і SiO_4^{4-} формують гель С–S–Н, що й забезпечує основний приріст міцності mdpi.com. Таким чином, спільна гідратація шлаку і клінкеру має синергічний ефект: шлак споживає портландитовий луг і продукує додатковий цементуючий С–S–Н, ущільнюючи структуру цементного каменю.

– Сульфатне (гіпсове) активування. Додавання сульфатів кальцію (гіпс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ або ангідрит CaSO_4) в присутності лужного компонента (типово $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або невеликої дози клінкеру) забезпечує утворення значної кількості еттрінгіту з алюмінатів шлаку. Суперсульфатний цемент – це система ~80–85% шлаку + ~10–15% ангідриту (або гіпсу) + ~5% гідратного вапна чи цементу-«затравки». Гідратація такої суміші йде з утворенням еттрінгіту (на початкових стадіях) та С–S–Н (пізніше). Еттрінгіт заповнює пори та надає ранню міцність: відомо, що формування достатньої кількості еттрінгіту здатне підвищити ранню міцність цементного каменю. Дослідження показують, що в шлак-вапно-ангідритних системах утворюється більше еттрінгіту, ніж у чисто лужних, і саме це зумовлює вищу міцність таких зразків у ранньому віці.

Суперсульфатні цементи мають дуже низьке тепловиділення та високу стійкість до агресивних середовищ, оскільки продукти їх гідратації бідні на вільний $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (який є вразливим до кислот і сульфатів). Недоліком є повільний набір міцності перших діб та чутливість до умов тверднення (температура, вологість).

Механічне активування. Тонке помелення шлаку підвищує його реакційну здатність. Чим більша питома поверхня шлакового порошку, тим швидше він гідратує за наявності активаторів. Для шлаків часто застосовують спільний помел з невеликою кількістю гіпсу та лужних солей: при цьому подрібнення сприяє руйнуванню структури гранул шлаку, а добавки –

створенню на його поверхні активних центрів гідратації sciencedirect.com. Інколи використовують комбінацію механічного та хімічного активування – наприклад, помел шлаку разом з лугами або сульфатами, або активацію вже укладених шлакових сумішей пропарюванням, вібрацією тощо.

Отже, доменний гранульований шлак є ефективним в'язучим за умови належного активування. Керуючи хімічними та фізичними параметрами (склад шлаку, дисперсність, тип і доза активатора), можна отримати різні за властивостями системи – від повільнотвердіючих і високоміцних (для масивних конструкцій) до швидкотужавіючих (для ремонту, тампонажу), що знаходить відображення у сучасних дослідженнях та стандартах.

5.1.2 Огляд ангідридів у будівельних матеріалах та їх властивості

Ангідриди кислот – це оксиди, що є безводними похідними кислот. У контексті будівельних матеріалів найбільше значення мають ангідриди неорганічних кислот, які можуть вступати в реакції гідратації або впливати на перебіг тверднення. Наведемо огляд основних ангідридів, що застосовуються або розглядаються в технологіях в'язучих.

Ангідрид сірчаної кислоти (SO_3) – у чистому вигляді це летка сполука (сірчаний ангідрид), але в цементній хімії під «вмістом SO_3 » розуміють кількість сульфат-іону, зазвичай внесеного у вигляді гіпсу ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) або ангідриту (безводного сульфату кальцію, CaSO_4).

Сульфат кальцію – обов'язковий компонент портландцементу, що регулює час тужавіння і запобігає надто швидкому схоплюванню (гідратації C_3A). У стандартному цементі вміст SO_3 становить $\sim 3\text{--}5\%$. В шлакових системах додатковий сульфат (ангидрит) використовується як активатор: він реагує з алюмінатами шлаку, утворюючи еттрінгіт, що, як було сказано, сприяє ранній міцності.

Ангидритне в'язуче – це окремий тип гіпсового в'язучого, отриманого випалом гіпсу до безводного стану. Чистий ангидрит (CaSO_4) твердне дуже

повільно, тому його гідратацію прискорюють додаванням лугів або сульфатів лужних металів.

Наприклад, додавання Na_2SO_4 або FeSO_4 до ангідриту значно підвищує його міцність за рахунок утворення дрібнокристалічного гіпсу при гідратації.

У сучасних системах ангідрит широко застосовується:

- (1) як регулятор тужавіння в цементах;
- (2) як основний компонент самовирівнювальних підлогових сумішей (ангідритні наливні підлоги дають мінімальну усадку);
- (3) у складі шлакових в'язучих (суперсульфатних цементах) та інших комбінованих систем.

Ангідрид борної кислоти (B_2O_3) – оксид бору, який привернув увагу дослідників завдяки своїм унікальним властивостям впливу на гідратацію цементів. Борні сполуки (боракс $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, борна кислота H_3BO_3 тощо) відомі як уповільнювачі тужавіння. Введення невеликих кількостей борних сполук значно подовжує час схоплення цементу, що корисно при бетонуванні в жаркому кліматі або великих масивів. Механізм дії бору полягає у взаємодії борат-іонів із іонами кальцію з утворенням на поверхні цементних зерен шару гідратованого борату кальцію, який уповільнює розчинення клінкерних фаз.

Таким чином, бор виступає контрольованим інгібітором гідратації.

Важливо, що ці ефекти переважно стосуються ранніх стадій тужавіння – дослідження показують, що хоча борна добавка сповільнює початкову гідратацію (через утворення комплексів кальцій-борату), на пізні строки міцність цементу практично не погіршується.

Окрім ролі сповільнювача, оксид бору перспективний як компонент спеціальних цементів. Зокрема, бороактивований білітовий цемент – це різновид низькоклінкерного цементу, де B_2O_3 додають при випалюванні клінкеру для стабілізації високотемпературних модифікацій C_2S (біліту). Невеликі добавки B_2O_3 діють як флюс, знижуючи температуру випалу та сприяючи утворенню більш реакційноздатного біліту.

Такий цемент має менший вміст алітової фази (C_3S) і, відповідно, нижчі енерговитрати на виробництво, а за деякими даними – й підвищену сульфатостійкість. Дійсно, дослідження 2020 р. показало, що бетон на борвмісному білітовому цементі краще протистоїть сульфатній корозії, ніж



Рисунок 5.3 – Використання ангідридів для розробки компонентів будівельних шлакових в'язучих

Ангідрид фосфорної кислоти (P_2O_5) – оксид фосфору, що застосовується головним чином у вигляді похідних (фосфатів) у будівельних матеріалах. Найбільш відомі фосфатні цементні на основі взаємодії оксидів з фосфорним ангідридом або фосфатовмісними розчинами. Наприклад, магнезіальний фосфатний цемент отримують змішуванням MgO з розчином амоній фосфату; він швидко твердне (за лічені години) з утворенням кристалів струвіту і застосовується для швидкого ремонту. Інший приклад – фосфогіпс, побічний продукт виробництва добрив, що складається головним чином з $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, але містить домішки фосфорної кислоти та її ангідриду.

До менш поширених, але потенційно цікавих для будівельної хімії, можна віднести ангідриди кремнієвої кислоти (SiO_2) та вуглецевої кислоти (CO_2). Діоксид кремнію у вигляді мікрокремнезему широко використовується

як пуцолановий додаток, що підвищує щільність і міцність цементного каменю (реагуючи з $\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Вуглекислий ангідрид (CO_2) все частіше розглядається не як загроза, а як реагент: методи карбонізації бетонів та штучного каменю дозволяють прискорено тверднути матеріалам шляхом інжекції CO_2 , який взаємодіє з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням карбонату кальцію. Такі технології розвиваються в руслі концепції Carbon Capture and Utilization, хоча поки що мають обмежене застосування через складність контролю процесу.

Отже, ангідриди кислот – це цілий клас хімічних сполук, кожна з яких по-своєму впливає на процеси структуроутворення у в'язучих системах. Сучасні дослідження направлені на пошук оптимальних способів використання цих ефектів для поліпшення властивостей будівельних матеріалів.

5.1.3 Механізми взаємодії ангідридів зі шлаками та мінеральними компонентами

Введення ангідридів до складу шлакових в'язучих змінює характер протікання гідратаційно-тверднучих реакцій. Нижче розглянуто механізми взаємодії найбільш значущих ангідридів (сульфатів, боратів, фосфатів) зі шлаковою в'язучою системою та її мінеральними компонентами.

Сульфат-іони (SO_4^{2-}), що надходять від гіпсу або ангідриту, реагують насамперед з алюматним компонентом шлаку. Доменний шлак містить оксиди Al_2O_3 (8–14%), які при розчиненні в лужному середовищі дають комплексні йони $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$. У присутності кальцію та сульфату ці йони утворюють кристали еттрінгіту – $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ (так звану фазу AFt). Еттрінгіт випадає в поровому розчині у вигляді довгих призм або голок, заповнюючи пори цементного каменю.

Якщо в системі наявна достатня кількість вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (наприклад, від домішки портландцементу або вапна), утворення еттрінгіту відбувається

інтенсивно вже на ранніх етапах тверднення. Як відзначалося, еттрінгітоутворення позитивно позначається на ранній міцності – згідно з результатами досліджень, у шлакових зразках, активованих $\text{CaO} + \text{CaSO}_4$, фіксується більша кількість еттрінгіту і, відповідно, вища міцність у порівнянні з чисто лужною активацією NaOH .

Мікроструктурно, еттрінгіт створює каркас, що утримує форму та сприяє зменшенню пористості (до певного моменту).

Надлишок сульфату, втім, може призвести до появи надлишкового еттрінгіту, який на пізніх стадіях переходить у моносульфат (AFm-фаза) або навіть викликає внутрішнє розширення. Тому в реальних складах дозування сульфатів оптимізують. Загалом механізм дії сульфатного активатора зводиться до сульфоалюмінатної активації: сульфат кальцію + алюмінати шлаку + луг \rightarrow еттрінгіт + C-S-H + ... (інші гідрати). Цей механізм лежить в основі суперсульфатних цементів і так званих еттрінгітних в'язучих. Як свідчить патентна та наукова література, поєднання шлаку, сульфатів і додаткових компонентів (напр. портландцементу або алюмінатного цементу) дає можливість отримувати нові матеріали з регульованим часом схоплювання і високою ранньою міцністю за рахунок контрольованого еттрінгітоутворення.

Борати (ангідриди борних кислот) у шлакових системах виконують подвійну роль. З одного боку, борна кислота та її солі значно уповільнюють початкову гідратацію шлаку (як і портландцементу).

Причина – утворення борнокальцієвих комплексів у розчині, які осідають на зернах у вигляді тонкої плівки гідратів борнокальцієвої солі.

В результаті, індукційний період гідратації подовжується, час схоплювання зростає, що корисно для забезпечення роботи з сумішшю (особливо при підвищених температурах).

З іншого боку, бор здатний вбудовуватися в структуру алюмосилікатного гелю, що утворюється при твердненні шлаколужних матеріалів.

Атом бору в чотирикоординатному стані $[\text{BO}_4]^-$ за своїми розмірами і зарядом близький до $[\text{AlO}_4]^-$, тому може заміщувати Al в каркасі геополімерного (гелеподібного) продукту.

Таким чином, присутність боратів може модифікувати будову C–S–H/герметичного гелю, впливаючи на міцність і усадку. Експериментально встановлено, що додавання борних солей у лужні розчини для активації шлаку не тільки подовжує час схоплювання, а й може покращити деякі властивості затверділого матеріалу.

Приміром, при твердненні шлакового в'язучого в присутності боратів спостерігалось зниження усадки і достатні показники міцності на 28 добу.

Важливо підкреслити, що негативний вплив бору проявляється лише на ранніх етапах (уповільнення набору міцності в першу добу), надалі ж різниці у кінцевій міцності між зразками з борними добавками та без них може не спостерігатися.

Таблиця 5.1 – Вплив ангідридів на гідратацію та тверднення шлакових в'язучих

Ангідрид / група	Основні джерела в системі	Ключові іонні/фазові взаємодії	Вплив на гідратацію і тужавіння	Вплив на мікроструктуру	Вплив на міцність	Ризики та обмеження	Практичне значення
Сульфатні (SO₄²⁻)	Гіпс, ангідрит, Na ₂ SO ₄ (вторинно)	[Al(OH) ₄] ⁻ + Ca ²⁺ + SO ₄ ²⁻ → еттрінгіт (AFt); за надлишку → AFm	Прискорення ранніх реакцій за наявності Ca(OH) ₂	Формування голчастого каркасу, зменшення пористості (на ранніх стадіях)	Підвищення ранньої міцності; за оптимального дозування – стабільна	Надлишок → вторинні перетворення, внутрішнє розширення	Основа суперсульфатних та еттрінгітних в'язучих; регулювання строків схоплювання
Борні (B₂O₃, борати)	Борна кислота, борні солі, борвмісні відходи	Утворення борнокальцієвих комплексів; включення [BO ₄] ⁻ у алюмосилікатний гель	Значне уповільнення початкової гідратації; подовження індукційного періоду	Пасивуючі плівки на зернах; модифікація C-S-H/гелю	Зниження ранньої; кінцева міцність зберігається	Уповільнення набору міцності в першу добу	Корисні для керування тужавінням, зменшення усадки, утилізації борвмісних відходів
Фосфорні (P₂O₅, фосфати)	Фосфати кальцію, фосфогіпс, домішки у шлаку	Осади CaHPO ₄ ·2H ₂ O, Ca ₂ P ₂ O ₇ ; ізоморфна заміна Si; вторинне утворення Na ₂ SO ₄	Може різко прискорювати або інгібувати гідратацію	Осади на зернах; дефекти росту кристалів ангідриту	Нестабільна: швидке схоплювання або зниження ранньої	“Отруєння” гідратації при надлишку P ₂ O ₅ (>1–2%)	Для швидкотверднучих та спеціальних в'язучих; потребує точного дозування

Особливий інтерес борати становлять для задач утилізації відходів: борвмісні рідини (наприклад, радіоактивні відходи атомних станцій, що містять борну кислоту для регулювання нейтронів) важко цементувати звичайним цементом через сильне сповільнення, але використання лужних шлакових цементів виявилось успішним. Дослідження показали, що навіть при значному вмісті бору можна отримати задовільну міцність і час тужавіння в лужно-активованих шлакових системах.

Отже, механізм дії борних ангідридів у шлакових в'язучих зводиться до початкової пасивації поверхні (уповільнення) з наступним поступовим включенням бору в кристалогідратні та гелеві фази без шкоди для кінцевої структури матеріалу.

Фосфати (ангідрид фосфорної кислоти та його похідні) у шлакових системах можуть викликати два протилежні ефекти залежно від умов: різке прискорення тужавіння або, навпаки, уповільнення і “отруєння” гідратації. Невеликі добавки фосфатів кальцію часто викликають швидке тужавіння через утворення нерозчинних осадів на основі $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (брушит) або інших фосфатних гідратів, що “зв’язують” воду і ущільнюють структуру.

Принцип використовується, наприклад, у магнезіальних фосфатних цементах для швидкого схоплювання. У шлакових пастах, де є надлишок $\text{Ca}(\text{OH})_2$, доданий фосфат може сприяти утворенню первинних фосфатних осадів, які прискорюють зв’язування води.

Водночас високий вміст P_2O_5 у складі шлаку або гіпсу діє як модифікатор структури: фосфор може ізоморфно заміщувати кремній в склоподібній структурі шлаку, роблячи її більш полімеризованою, що знижує реактивність (тому домішки $\text{P}_2\text{O}_5 > 1-2\%$ у шлаку небажані).

При гідратації шлакових цементів фосфат-іони можуть взаємодіяти з Ca^{2+} з утворенням погано розчинних фосфатів кальцію, що осідають на зернах і уповільнюють подальшу гідратацію (ефект аналогічний діям бору, але більш сильний). У випадку ангідритного цементу з фосфогіпсу вже згадувалося, що P_2O_5 утворює з CaO фазу $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$, яка росте на кристалах ангідриту і порушує

їх нормальний ріст при гідратації. Цікаво, що присутність фосфатів може призводити й до побічних реакцій: так, у дослідах по випалу фосфогіпсу було виявлено утворення Na_2SO_4 як побічного продукту взаємодії домішок P і F з сульфатом кальцію.

Такий Na_2SO_4 , потрапляючи у розчин при гідратації, діє вже як сульфатний активатор, прискорюючи тверднення.

Таким чином, механізм дії фосфорного ангідриду складний: він може одночасно й прискорювати початок реакції (через утворення додаткового сульфату натрію), і знижувати міцність ранніх структур (через дефекти кристалів ангідриту та осади фосфатів кальцію).

З точки зору застосування, фосфати доцільно вводити, коли потрібне дуже швидке схоплювання або специфічні властивості (наприклад, фосфатні вогнетривкі бетони), але їх дозування слід підбирати обережно, щоб не погіршити довгострокову міцність.

Підсумовуючи, ангідриди по-різному взаємодіють із компонентами шлакових систем: сульфатні – утворюють кристалізаційно-зміцнюючі продукти (еттрінгіт), борні – тимчасово пасивують і перебудовують гелеву фазу, фосфорні – можуть як каталізувати, так і інгібувати гідратацію через утворення малорозчинних фаз.

Розуміння цих механізмів дозволяє раціонально підходити до розробки композицій модифікованих в'язучих.

5.1.4 Перспективи використання ангідридів у модифікованих в'язучих системах

Використання ангідридів відкриває нові можливості в інженерії в'язучих матеріалів. На основі проаналізованих механізмів взаємодії можна окреслити декілька перспективних напрямів розробки модифікованих в'язучих з участю шлаку і ангідридів:

1) Суперсульфатні низькоклінкерні цементи. Як вже зазначалося, суперсульфатний цемент (SSC) на ~80–90% складається з гранульованого шлаку та ~10–20% ангідриту, з невеликою додатковою лужною активацією.

Такі цементи мають вкрай низький вміст клінкеру, що різко знижує вуглецевий слід виробництва.

Перспективність SSC підтверджується їх високою довговічністю: дослідження показують відмінну стійкість суперсульфатних цементів (особливо отриманих на основі відходів – фосфогіпсу) до сульфатної корозії (у тому числі в магнієвих сульфатах), а також підвищену опірність

Технологічні випробування показали, що ангідритний цемент з фосфогіпсу має енергетичні переваги – його випал потребує нижчої температури (~900–1000 °C) порівняно з клінкером і може відбуватися в шахтних печах або навіть шляхом утилізації тепла інших процесів.

Отже, розвиток SSC сприяє циркулярній економіці та декарбонізації будівництва.

2) Композитні швидкотужавіючі в'язучі. Поєднання різних компонентів – шлаку, ангідриту, високоактивних цементів – дозволяє створювати в'язучі зі спеціальними властивостями. Перспективним є розроблення еттрінгітних в'язучих швидкого тверднення: наприклад, суміш шлаку, сульфату кальцію і високоалюмінатного цементу (ГАЦ) формує так званий стратлінгіт-еттрінгітний камінь.

ГАЦ постачає значну кількість Al_2O_3 і CaO , шлак – додатковий SiO_2 і запізнілий джерело Ca , а ангідрит – сульфат. Гідратація такої суміші веде до вибухового утворення еттрінгіту і стратлінгіту (C_2ASH_8), що забезпечує дуже швидке схоплювання та тверднення. Подібні системи вже тестуються для виробництва ремонтних розчинів, клеїв для плитки, наливних підлог – всюди, де потрібен швидкий набір міцності.

Використання шлаку в таких складах дозволяє знизити витрати дорогого ГАЦ і пом'якшити тепловиділення, водночас ангідрит забезпечує контрольоване утворення еттрінгіту. Перспектива полягає в оптимізації

співвідношень: за допомогою підбору кількості сульфату і лужності можна регулювати час життя суміші та міцнісні показники. Очікується, що такі гібридні в'язучі знайдуть нішеве застосування в тих випадках, де портландцемент не справляється (наприклад, дуже швидкий ремонт при низьких температурах, тампонаж свердловин тощо).

3) Регуляція реології та усадки за допомогою боратів. Включення борвмісних компонентів у шлакові в'язучі розглядається як метод поліпшення технологічних властивостей сумішей. Як відзначалося, борат-іони значно подовжують час схоплювання і підвищують рухомість (час зберігається більшим).

Інша перспектива – зменшення усадки лужно-активованих шлакових композицій. Відомо, що геополімерні матеріали мають проблему усадки при висиханні, що спричиняє тріщини. Дослідження останніх років показали, що введення борних солей (наприклад, часткова заміна силікатного лугу на бура) може знизити усадку без істотної втрати міцності.

Бор, ймовірно, модифікує структуру гелю, роблячи її більш гнучкою і менш схильною до капілярного стягування. Отже, перспективним є створення добавок на основі бору для шлаколужних цементів з метою поліпшення їх тріщиностійкості та зручності в роботі. Додатково, як було згадано, борні компоненти можуть надати матеріалу спеціальні властивості (радіаційний захист), що відкриває можливості застосування шлакових в'язучих в ядерній енергетиці та сховищах відходів.

4) Утилізація відходів і побічних продуктів. Включення ангідридів у шлакові в'язучі часто можна поєднати з вирішенням екологічних проблем утилізації відходів. Яскравий приклад – використання фосфогіпсу. Цей відхід у величезних кількостях накопичується біля хімічних підприємств, становлячи екологічну загрозу. Переробка фосфогіпсу на ангідритне або суперсульфатне в'язуче дозволяє зменшити гори відходів і замінити природний гіпс у цементі.

Інший приклад – зола винесення від спалювання вугілля, що часто містить реактивні оксиди (зокрема, оксид бору може міститися в золах деяких вугільних родовищ).

Включення такої золи до лужних цементів не лише утилізує її, а й потенційно покращує властивості (ефект пуцолани та борного уповільнювача). Таким чином, перспектива розвитку шлако-ангідритних систем тісно пов'язана з концепцією «зеленого» будівництва – максимально можливим використанням промислових відходів у якості сировини для нових матеріалів.

5) Підвищення довговічності і стійкості. Комбінування шлаку з певними ангідритами дозволяє отримати матеріали із покращеною стійкістю до агресивних чинників. Наприклад, шлак сам по собі підвищує сульфатостійкість цементу (зменшуючи вміст СзА і утворюючи щільніший камінь).



Рисунок 5.4 – Оптимізація твердіння складу в'язучих

Є дані, що суперсульфатні цементи надзвичайно стійкі до кислотного середовища, оскільки їх продукти гідратації містять мало портландиту і легко утворюють захисний шар гіпсу на поверхні при дії кислоти. Борвмісні шлакові цементі показують покращену корозійну стійкість арматури завдяки більш низькій проникності хлоридів. Тому перспективним напрямом є розробка

спеціальних композицій для суворих умов – наприклад, шлако-борсульфатних в'язучих для каналізаційних колекторів, очисних споруд, морських причалів тощо.

Поєднання декількох ангідридів також можливе: скажімо, комплексна добавка із сульфату і борної сполуки може збалансувати ранню міцність та реологію.

Отже, застосування ангідридів у шлакових в'язучих є багатообіцяючим напрямом. Правильний добір виду та кількості ангідриду дозволяє налаштувати властивості матеріалу під конкретні вимоги: чи то прискорення чи сповільнення тужавіння, підвищення міцності чи тріщиностійкості, довговічності в агресивних середовищах чи спеціальних функцій (захист від радіації). Подальші дослідження у цій галузі спрямовані на оптимізацію таких систем і перевірку їх ефективності в реальних умовах експлуатації.

5.2 Методи розробки та синтезу компонентів в'язучих

5.2.1 Вибір та підготовка сировинних матеріалів

Розробка складів шлакового в'язучого з використанням ангідриту

У цьому розділі представлено розроблення будівельного шлакового в'язучого, модифікованого ангідритом, а також описано сировинні компоненти, технологічні етапи підготовки сумішей та механізми активації тверднення.

Метою є створення безклінкерного в'язучого матеріалу на основі гранульованого доменного шлаку та ангідриту (безводного сульфату кальцію) з використанням хімічних добавок для регулювання властивостей. Такий підхід дозволяє утилізувати промислові відходи (металургійні шлаки і відходи гіпсовмісних виробництв) і знизити викиди CO₂ за рахунок заміни частки портландцементу, забезпечивши при цьому достатню міцність і довговічність матеріалу.

Нижче детально розглянуто характеристики вихідних матеріалів, процес їх підготовки, склад експериментальних в'язучих сумішей та особливості перебігу реакцій гідратації шлаку з ангідритом і модифікуючими добавками.

Гранульований доменний шлак. В якості основного компонента в'язучого використано гранульований доменний шлак – відхід металургійного виробництва, що утворюється при виплавці чавуну. Шлак отримували шляхом різкого охолодження розплаву водою, внаслідок чого він набував аморфної структури та гідравлічних властивостей. Для застосування у в'язучому шлак було висушено і подрібнено до тонкодисперсного стану. Питомий поверхню шлаку забезпечували на рівні $\sim 400\text{--}450$ м²/кг, що сприяє підвищенню реакційної здатності. Хімічний склад шлаку відповідав вимогам до сульфатно-шлакових в'язучих: він містив переважно оксид кальцію і діоксид кремнію (сума CaO + SiO₂ понад 70%), значну кількість оксиду алюмінію (Al₂O₃ близько 10–15%) та помірний вміст оксиду магнію. Вміст сірчанних сполук і вільного CaO в шлаку був низьким, що є важливим для запобігання небажаним об'ємним змінам. Попередній хімічний аналіз підтвердив, що склад шлаку належить до так званих «кислих» шлаків із помірною основністю (відношення CaO/SiO₂ близько одиниці), що вважається сприятливим для взаємодії зі сульфатними добавками.

Ангідрит (безводний гіпс). В'язучий компонент сульфатної природи вводили у вигляді ангідриту – безводного сульфату кальцію (CaSO₄). Ангідрит отримували шляхом термічної обробки гіпсовмісної сировини. Зокрема, використовували відхідний гіпс (наприклад, фосфогіпс або продукт десульфурзації газів), який випалювали при температурі не нижче 600 °C до повного видалення кристалізаційної води.

Після випалу утворений ангідрит подрібнювали до тонкого порошку, співставного за дисперсністю зі шлаком. Отриманий ангідрит містив понад 95% CaSO₄ і характеризувався високою хімічною чистотою та активністю. Введення ангідриту до складу в'язучого забезпечує джерело сульфат-іонів

для активації шлаку та утворення додаткових цементуючих продуктів при твердненні.

Важливою характеристикою ангідриту є його повільна розчинність у воді, завдяки чому реакції гідратації протікають поступово, без різкого тепловиділення. Для рівномірного розподілу у в'язучому ангідрит ретельно змішували зі шлаковим порошком; в деяких випадках здійснювали спільне механічне помелення шлаку з ангідритом, що могло сприяти механохімічній активації їх взаємодії.

Для регулювання кінетики тверднення та властивостей шлако-ангідритового в'язучого застосовано низку хімічних добавок невеликої дозування. Зокрема, розглядали такі типи модифікаторів:

В якості органічного електроліту-активатора використовували ацетат натрію (солі оцтової кислоти). Невелика кількість ацетату (порядку 1–2% маси в'язучого) вводилася для часткової активації шлаку та модифікації структури цементного каменю. Ацетат натрію при розчиненні утворює слабколужне середовище (підвищує рН до ~9), чим стимулює початкову гідратацію шлаку без надмірно швидкої реакції. Крім того, ацетат-іони здатні взаємодіяти з продуктами гідратації, утворюючи кальцій ацетати або вбудовуючись у структуру гідратів. Очікується, що присутність ацетатної добавки подовжує час схоплення (спостерігалось значне сповільнення початку тверднення порівняно зі звичайною лужною активацією) та знижує тепловиділення. Водночас органічні групи, ймовірно, надають гідратним фазам певні гідрофобні властивості, що в перспективі покращить водостійкість затверділого матеріалу.

Для керування часом тужавлення до складу вводили борну добавку – наприклад, буру (натрієва сіль тетраборної кислоти) у кількості близько 0,5% від маси в'язучого. Бура відома як ефективний регулятор, що подовжує період схоплювання гіпсових та альтернативних цементів. Додавання борної сполуки уповільнює початкові реакції гідратації: борнати адсорбуються на зародках кристалів іони кальцію, знижуючи їхню концентрацію в розчині, а також дещо

зменшують початкову лужність середовища. У результаті індукційний період гідратації істотно збільшується, запобігаючи надто швидкому тужавленню шлако-ангідритового в'язучого.

Було встановлено, що навіть долі відсотка борної добавки можуть продовжити час початкового схоплення суміші до кількох годин (у залежності від дозування), що значно перевищує показники без додатків. При цьому надмірне дозування бору не використовується, щоб після подовженого індукційного періоду все ж відбувалося повноцінне тверднення в оптимальні строки.

Окремо досліджувалося введення додаткового сульфатного активатора у вигляді легкорозчинної солі. З цією метою до складу деяких сумішей додавали сульфат натрію (Na_2SO_4) у кількості до 1% або сульфат калію (K_2SO_4) у подібній дозі.

Ці добавки покликані підвищити концентрацію сульфат-іонів у рідкій фазі на ранніх стадіях гідратації. Легкорозчинний сульфат натрію швидко дисоціює у воді, забезпечуючи високий вміст сульфатів і натрій.

Це сприяє інтенсивнішому утворенню етtringіту (кальцій-алюмінат-сульфатного гідрату) з участю алюмооксидних компонентів шлаку. Окрім того, іони натрію частково заміщують кальцій у рідкій фазі, що може опосередковано підвищити розчинність компонентів шлаку.

Відомо, що сульфатна активація шлаку приводить до дещо повільнішого наростання міцності, ніж високолужні активатори, але забезпечує меншу усадку і кращу корозійну стійкість. Отже, додавання незначної кількості Na_2SO_4 або K_2SO_4 покликане інтенсифікувати початкові реакції зі створенням дрібнокристалічного етtringіту, який підвищує ранню міцність без руйнування структури (оскільки утворюється в умовах обмеженої кількості вільного вапна і не викликає шкідливого розширення цементного каменю).

Всі зазначені добавки вводилися у висушений порошкоподібний шлако-ангідритовий склад на стадії його приготування. Для рівномірного

розподілу хімічних модифікаторів використовували змішування в лабораторному змішувачі протягом заданого часу.

Таким чином, були підготовлені серії в'язучих сумішей із різними схемами активації:

1. Сульфатно-лужна активація: шлак + ангідрит + добавка лужного сульфату (Na_2SO_4 або K_2SO_4). Ця система покликана забезпечити швидке утворення сульфатних гідратів і ранню міцність;

2. Органічно-лужна активація: шлак + ангідрит + ацетат натрію. Такий склад формує гібридне органо-неорганічне в'язуче, в якому помірна лужність забезпечує гідратацію шлаку, а органічні аніони модифікують структуру гідратів;

3. Комбінована активація: шлак + ангідрит + комплекс добавок (наприклад, одночасне введення ацетату натрію і незначної кількості бури або сульфату). Метою комбінованої схеми є збалансувати процеси тужавлення і тверднення – забезпечити достатній час роботи суміші (через борну добавку або властивості ацетату) та водночас не надто затримувати набір міцності (за рахунок присутності додаткового сульфату для стимуляції реакції).

Параметри і склад експериментальних сумішей. На основі зазначених компонентів були розроблені декілька варіантів складів шлако-ангідритового в'язучого. В усіх складах загальний вміст шлаку і ангідриту складав 100% (зв'язувальна основа), при цьому частка ангідриту варіювалася від 15% до 40% маси, а решту становив шлак (від 85% до 60% відповідно). Збільшення кількості ангідриту потенційно підвищує насиченість сульфатами і інтенсифікує утворення етtringіту, проте одночасно зменшує частку активного шлаку, тому досліджено декілька співвідношень для визначення оптимального. До базових складів додавалися модифікатори згаданих типів у малих дозах. Зокрема, типовими були такі рецептури:

- **Склад А:** 85% шлаку + 15% ангідриту + $\sim 1\%$ Na_2SO_4 (від маси в'язучого). Цей склад відноситься до класичного сульфатно-активованого і слугував контрольним для оцінки ефективності інших добавок;

- **Склад В:** 70% шлаку + 30% ангідриту + ~1% CH_3COONa (ацетату натрію). Такий матеріал містить підвищену кількість ангідриту і органічний активатор, що дозволяє оцінити вплив гібридної активації на міцність і структуру;
- **Склад С:** 60% шлаку + 40% ангідриту + комплекс добавок (наприклад, 0,8% ацетату натрію + 0,5% бури). Цей склад є надлишково-сульфатним, з максимальною досліджуваною часткою ангідриту, де поєднання добавок покликане запобігти надто швидкому тужавленню та забезпечити поступовий приріст міцності.

Всі суміші ретельно перемішувалися в сухому вигляді для рівномірного розподілу компонентів, після чого до них додавалася вода затворення стандартної витрати (водо-твердне відношення встановлювалося в межах 0,4–0,5 в залежності від складу, щоб отримати нормальну густоту теста). Приготовані розчинні суміші використовувалися для формування зразків (стандартні призми або циліндри) шляхом заливання у форми з наступним віброкомпактуванням.

Особлива увага приділялася умовам тверднення: затвердження зразків відбувалося у вологому середовищі при температурі 20 ± 2 °С. Підтримання підвищеної відносної вологості (не менш 95%) у перші 7–28 діб було критично важливим, оскільки наявність великої кількості сульфатного компонента потребує достатньої кількості води для повної кристалізації гідратів. Первинне тверднення проходило без теплової обробки, за нормальних умов, хоча для прискорення набору міцності можливе дослідження режимів тепловологісної обробки на подальших етапах.

5.2.2 Активація та механізм тверднення шлако-ангідритового в'язучого

Перебіг процесів гідратації і структуроутворення в розроблених шлако-ангідритових в'язучих відбувається завдяки взаємодії між частинками

гранульованого шлаку, ангідриту та іонами, що виділяються в розчин з доданих хімічних активаторів.

У водному середовищі ангідрит повільно розчиняється, підвищуючи концентрацію сульфат-іонів (SO_4^{2-}) і кальцію (Ca^{2+}) у поровому розчині. Одночасно поверхня частинок доменного шлаку поступово починає розчинятися під дією лужності розчину.

Якщо у систему введено лужні компоненти (наприклад, Na_2SO_4 або Na -ацетат), початкове рН розчину стає помірно лужним, що значно прискорює розчинення аморфних гранул шлаку. Іони кальцію, кремнію і алюмінію зі шлаку переходять у розчин і взаємодіють із сульфат-іонами, що надходять від ангідриту.

Основною реакцією тверднення є утворення еткрингіту – кристалічного гідросульфоалюмінату кальцію. Алюмінатні компоненти (Al_2O_3) шлаку в присутності сульфатів і кальцію формують голкоподібні кристали еттрингіту ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) вже на ранніх стадіях тверднення.

Таблиця 5.2 – Типові склади сировини для підготовки

Матеріал	Хімічний склад (%)	Підготовка	Роль
GGBFS	SiO_2 35, CaO 40, Al_2O_3 15	Подрібнення до 4500 $\text{cm}^2/\text{г}$, сушка	Гідравлічний компонент
Ангідрит (флюоргіпс)	SO_3 50, CaO 35, CaF_2 3	Нейтралізація вапняком, грануляція	Сульфатний активатор
SF	SiO_2 95	Без додаткової обробки	Позоланова добавка
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CaO 70 (після гасіння)	Гасіння водою	Лужний активатор

На відміну від портландцементу, де надмірне утворення етtringіту може спричинити руйнівне розширення, в досліджуваному безклінкерному в'язучому цей процес контрольований. По-перше, в системі обмежена кількість вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (гідратного вапна), тому етtringіт випадає у вигляді дрібних рівномірно розподілених кристалів, які заповнюють поровий простір, не викликаючи внутрішніх напружень.

По-друге, частина сульфат-іонів споживається поступово, у міру розчинення ангідриду, тому інтенсивність росту етtringіту стримана і керована. Утворений етtringіт відіграє подвійну роль: він забезпечує початкову міцність структури (створюючи жорсткий каркас, що з'єднує зерна незреагованого шлаку) і одночасно слугує каталізатором подальших реакцій гідратації, оскільки виділення тепла та локальне підвищення рН у його присутності стимулюють розчинення кремнезему зі шлаку.

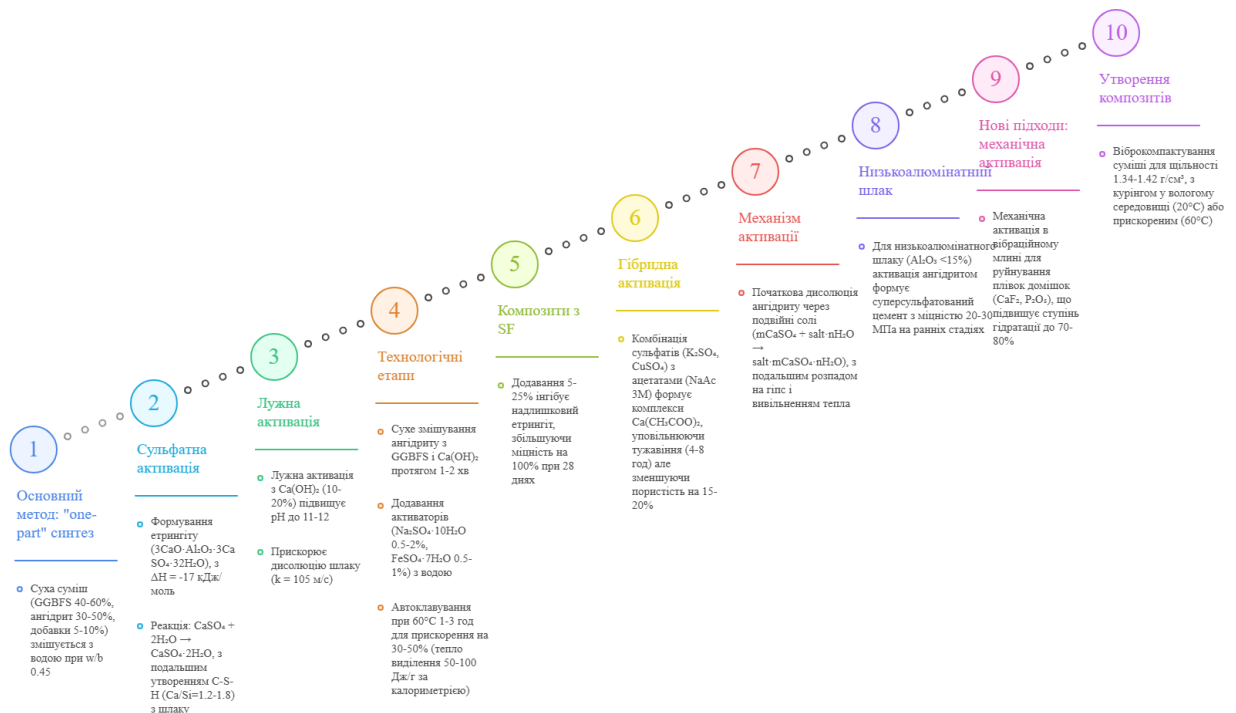


Рисунок 5.4 – Активація ангідриду покроково

Наступним етапом тверднення є формування кальцієвих гідросилікатів (CSH-фаз) та гідроалюмінатів кальцію. Кремнезем і залишкові алюмооксидні

сполуки шлаку, реагуючи з іонами Ca^{2+} у лужному сульфатному середовищі, утворюють аморфно-кристалічні гелеподібні продукти – гідросилікати кальцію. CSH-гідрати заповнюють простір між кристалами етtringіту і не реагованими зернами, надаючи каменю в'язучого додаткову міцність і щільність.

Паралельно можуть утворюватися гідроалюмінати кальцію (при нестачі сульфатів частина Al_2O_3 зв'язується в сполуках типу $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). Таким чином, кінцева структура тверднучого шлако-ангїдритового каменю складається з міцного каркасу голчастих кристалів етtringіту, оточених матрицею з CSH-гелю і інших дрібнокристалічних гідратів, що разом обумовлюють високу міцність матеріалу.

Вплив добавок на процеси гідратації. Наявність модифікуючих добавок помітно впливає на кінетику та напрямок зазначених реакцій. Сульфатні добавки ($\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{SO}_4$) на ранній стадії швидко насичують розчин сульфат-іонами, тому етtringіт починає утворюватися раніше і інтенсивніше.

Це скорочує час схоплення та прискорює початкове тверднення: пробні зразки із додаванням $\sim 1\%$ Na_2SO_4 демонстрували помітне збільшення міцності вже на першу добу в порівнянні зі складами без цієї добавки.

Однак надлишок розчинних сульфатів може призвести до випадіння частини CaSO_4 у вигляді гіпсу (двоводного сульфату кальцію) при випаровуванні води, тому дозування оптимізували, щоб вся додана сіль брала участь у корисних реакціях.

Ацетат натрію впливає двояко: з одного боку, ацетат створює слабколужне середовище (і певний вміст Na^+ , що теж сприяє активації шлаку), з іншого – органічні іони дещо уповільнюють кристалізацію неорганічних гідратів. В результаті у складах з ацетатом спостерігається подовжений період індукції гідратації. За вимірюваннями тепловиділення, введення $\sim 1\%$ CH_3COONa знижує сумарне тепловиділення в перші доби та розтягує його в часі. Початок схоплення таких сумішей може відтерміновуватися до десятків годин (замість декількох годин у системі лише з сульфатною активацією).

Попри повільніший набір початкової міцності, до 28-90 доби зразки з ацетатом демонструють ущільненішу структуру і покращену водостійкість. Пояснюється тим, що ацетат-іони здатні інтегруватися у структуру CSH-гелю, зменшуючи його пористість і гігроскопічність.

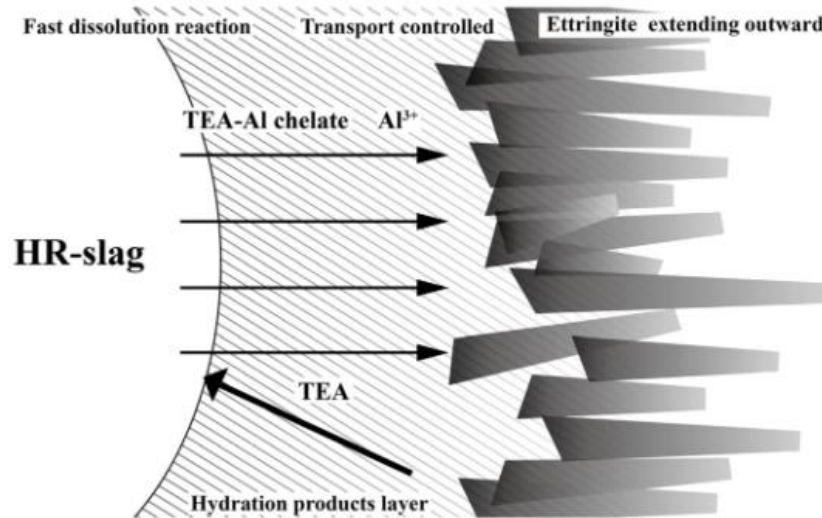


Рисунок 5.5 – Схема гідратації та тверднення шлако-сульфатного цементу [40]

Розглянута схема гідратації шлако-сульфатного цементу з додаванням триетаноламіну безпосередньо узгоджується з темою теоретичних основ використання шлакових в'язучих з ангідридами, оскільки наочно демонструє ключовий принцип керування гідратаційно-тверднучими процесами в шлакових системах – регулювання розчинення алюмосилікатної фази та спрямоване формування продуктів гідратації.

У теоретичному плані використання ангідридів у шлакових в'язучих ґрунтується на тому, що шлак є латентно-гідралічним матеріалом, реакційна здатність якого визначається швидкістю вивільнення іонів Ca^{2+} , Al^{3+} та SiO_4^{4-} у поровий розчин. Ангідриди (насамперед сульфатні) створюють у системі додаткові іонні компоненти, що переводять гідратацію з повільного гелевого механізму у кристалізаційно керований, пов'язаний з утворенням еттрінгіту.

Таким чином, органічно-мінеральна активація дозволяє отримати більш щільний і хімічно стійкий цементний камінь, хоча потребує більш тривалого часу тверднення для досягнення оптимальної міцності (наприклад, міцність може сягати ~40 МПа на 180-ту добу, тоді як при традиційній активації лугами шлак набирає більшу міцність за той же час).

Борна добавка (бура) істотно впливає на початкову стадію тверднення, майже не змінюючи характер кінцевих продуктів гідратації.

У присутності ~0,5% бури час схоплення може збільшуватися в кілька разів: наприклад, зафіксовано подовження до 10–15 годин (залежно від температури і інших умов) до початку помітного тужавлення, тоді як без бури суміш починала схоплюватися вже через 2–3 години. Це підтверджує інгібуючу дію бору на зародження етtringітних кристалів і розчинення шлаку.

Внаслідок цього перші гідратні продукти формуються більш повільно і рівномірно. Після вичерпання дії бури (її вплив носить тимчасовий характер, оскільки вона поступово включається в побічні реакції або вичерпується), гідратація поновлюється повною мірою.

Кінцевий набір міцності для зразків з борною добавкою за достатнього терміну тверднення практично не поступається контролю, оскільки всі необхідні реакції зрештою відбуваються, лише зі зсувом у часі. Отже, борвмісні регулятори рекомендуються для складних в'язучих, щоб забезпечити технологічну зручність (подовжений час життя розчину) без істотної втрати кінцевих показників.

Особливості структури і властивостей одержаного каменю. Розроблене шлако-ангідридове в'язуче після тверднення формує щільний дрібнопористий камінь світло-сірого кольору.

Мікроструктурний аналіз (проведений у подальших розділах дослідження) показує, що в матриці наявні голчасті кристали етtringіту, впорядковані пучками, а простір між ними заповнений гелеподібними продуктами (CSH та ін.). Наявність ангідриту в складі забезпечила утворення

достатньої кількості сульфатвмісних гідратів, які зв'язали значну частину води і надали каменю об'ємну стабільність.

Відзначено, що при високих дозах ангідриту (близько 40%) необхідно суворо дотримуватися вологих умов витримування: у разі пересихання зразків можливе неповне прореагування ангідриту і наявність вільного CaSO_4 , що в подальшому може призвести до його повільної гідратації і незначного внутрішнього розширення. Проте за правильного догляду (поступове тверднення у вологому середовищі) навіть склади з надлишковим сульфатним компонентом продемонстрували достатню водостійкість і відсутність тріщиноутворення.

В цілому, результати розробки складів підтвердили принципову можливість отримання безклінкерного шлакового в'язучого на основі ангідриту, здатного тверднути у водних умовах з формуванням міцного цементуючого каменю.

Оптимізовані композиції (з вмістом ангідриту близько 30% та комплексною активацією) забезпечують компресійну міцність затверділого розчину на рівні 40–50 МПа після нормативного терміну тверднення. Матеріал характеризується помірним тепловиділенням при твердненні, що знижує ризик термічних напружень у масивних конструкціях.

Відсутність портландцементного клінкеру в складі зменшує лужність порового розчину і, як наслідок, підвищує сульфатостійкість затверділого каменю – він менш схильний до корозії у сульфатних середовищах. Таким чином, використання гранульованого доменного шлаку в поєднанні з ангідритом та спеціальними хімічними добавками дозволило створити ефективне будівельне в'язуче, що відповідає вимогам екологічної безпеки та володіє необхідними експлуатаційними властивостями.

Даний підрозділ закладає науково-технічну основу для подальшого дослідження властивостей одержаного в'язучого матеріалу та оптимізації технології його застосування в будівництві.

5.2.3 Технологічні підходи до активації та створення композитів

Активація шлаково-ангідритних систем базується на сульфатній і лужній стимуляції гідратації. Основний метод: "one-part" синтез, де суха суміш (GGBFS 40-60%, ангідрит 30-50%, добавки 5-10%) змішується з водою при w/b 0.45. Сульфатна активація: ангідрит постачає SO_4^{2-} для формування еtringіту ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), з $\Delta H = -17$ кДж/моль. Реакція: $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, з подальшим утворенням C-S-H (Ca/Si=1.2-1.8) з шлаку. Лужна активація з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (10-20%) підвищує рН до 11-12, прискорюючи дисолюцію шлаку ($k = 10^5$ м/с).

Технологічні етапи:

- 1) Сухе змішування ангідриту з GGBFS і $\text{Ca}(\text{OH})_2$ протягом 1-2 хв;
- 2) Додавання активаторів ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.5-2%, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5-1%) з водою;
- 3) Автоклавовання при 60°C 1-3 год для прискорення на 30-50% (тепло виділення 50-100 Дж/г за калориметрією).

Для композитів з SF: додавання 5-25% інгібує надлишковий еtringіт, збільшуючи міцність на 100% при 28 днях. Гібридна активація: комбінація сульфатів (K_2SO_4 , CuSO_4) з ацетатами (NaAc 3M) формує комплекси $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, уповільнюючи тужавіння (4-8 год) але зменшуючи пористість на 15-20%.

Механізм: Початкова дисолюція ангідриту через подвійні солі ($m\text{CaSO}_4 + \text{salt} \cdot n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{salt} \cdot m\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), з подальшим розпадом на гіпс і вивільненням тепла.

Для низькоалюмінатного шлаку ($\text{Al}_2\text{O}_3 < 15\%$) активація ангідритом формує суперсульфатований цемент з міцністю 20-30 МПа на ранніх стадіях. Нові підходи: механічна активація в вібраційному млині для руйнування плівок домішок (CaF_2 , P_2O_5), що підвищує ступінь гідратації до 70-80%. Утворення композитів: віброкомпактування суміші для щільності 1.34-1.42 г/см³, з курінгом у вологому середовищі (20°C) або прискореним (60°C).

5.2.4 Експериментальна оптимізація формувань та моделювання процесів

Оптимізація проводиться за допомогою методології поверхні відгуку (RSM) з ортогональним дизайном L9(3⁴). Змінні: % GGBFS (40/50/60), % ангідриту (30/40/50), % активатора (CS 3-4%, SS 3-4%, СА 4%). Експериментальний дизайн: одиночні фактори тестуються спочатку (4% CS дає 36 МПа на 28 дні, 4% SS - 26.8 МПа), потім комбіновані.

Оптимальна формула: GGBFS 55%, ангідрит 35%, SF 5%, NaAc 5%, з міцністю 52 МПа (28 дні), початковим тужавінням 45 хв при 8% CS.

Тестування: Міцність на стиск (ISO 679) на 1, 7, 28, 90 дні (середнє з 4 зразків, $\sigma=0.1-3.5$ МПа); пористість MIP (12-18%); калориметрія для тепла (пік 80 Дж/г на 4-6 год); XRD для фаз (етрингіт, C-S-H, гіпс); SEM-EDS для мікроструктури (голчасті кристали етрингіту 1-5 мкм, гелі C-S-H 10-50 нм); TG-DTG для втрат маси (13.13% на 40-120°C - AFt/C-S-H, 9.72% на 120-200°C - гіпс). Моделювання:

Кінетика гідратації за Fick's law, $c(t)=c_0 \operatorname{erfc}(x/\sqrt{(4Dt)})$, $D=10^{-12}$ м²/с; SymPy для $d[\text{етрингіт}]/dt = k [\text{Al}][\text{SO}_4]$, $k=0.002$ с⁻¹. RSM передбачає оптимальну міцність 36-52 МПа, з мінімізацією пористості <15% при CO₂ <0.3 т/т.

Таблиця 5.3 – Результати оптимізації (28 дні, МПа)

Формула	GGBFS (%)	Ангідрит (%)	Добавки	Міцність	Пористість (%)
Оптимальна	55	35	CS 3.35%, SS 3.51%, СА 4.22%	52	12
Варіант А	50	40	SF 5%, NaAc 5%	48	15
Варіант В	60	30	FA 10%	45	18

5.2.5 Нові підходи до інтеграції добавок для підвищення ефективності

Сучасні підходи фокусуються на інтеграції добавок з промислових відходів для посилення властивостей. Органічна активація ацетатами (NaAc, KAc 2-5%) уникає ефлоресценції, формуючи стабільні комплекси з уповільненням нуклеації, але зниженням усадки на 10-20%. Сульфатні добавки (Na₂SO₄, CaSO₄) на ранніх стадіях (0.5-2%) прискорюють еtringіт, з $\Delta G = -150$ кДж/моль. Новизна: комбінована активація з карбідним шламом (CS 4%), натрієвим силікатом (SS 4%) та кальцинованим галунцем (CA 4%), створюючи 3D-мережу C-(A)-S-H та N-A-S-H гелів для щільності.

Інтеграція: Добавки вводять з водою (температура 5-8°C) або сухим методом (заміна 5-25% SF для інгібування еtringіту). Ефекти: Збільшення міцності на 70% з метаколіном (10-50%), скорочення тужавіння на 13-38%. З відходами: фосфоангідрит (P₂O₅ домішки) уповільнює ранню реакцію, але K₂SO₄ активує на 30%.

Модифікація: Полімерні добавки (функціональні полімери) розподіляються рівномірно, формуючи гідрофобну матрицю. Екологічні підходи: Використання золи та сталевого шлаку для іммобілізації металів (Cu/Zn <1 мг/л), з міцністю 20-30 МПа в бетонах. Гібридні системи: Алкалі-сульфатна активація з РС (малими добавками) для ранньої міцності 10-15 МПа (1 доба).

5.3 Властивості розроблених в'язучих, застосування та оцінка

5.3.1 Механічні та фізичні характеристики

Мікроструктура та гідратаційні продукти. Механічні властивості шлаково-ангідритних в'язучих зумовлені їхньою мікроструктурою, що формується в процесі гідратації. Ключову роль відіграють кристали еtringіту,

гелі C–S–H (кальцій-силікат-гідрат) та гідротальцитоподібні фази. Еtringіт утворюється внаслідок реакції сульфат-іонів з алюмінатами шлаку і росте у вигляді голчастих кристалів, заповнюючи пори матриці.

C–S–H-гелі з відносно низьким відношенням Ca/Si ($\approx 1.2\text{--}1.8$) утворюють щільний каркас, у який вбудовуються також гідротальцитоподібні фази (Mg–Al гідроксиди) завдяки підвищеному вмісту MgO у шлаку.

Сукупність цих продуктів забезпечує приріст міцності: зокрема, міцність шлаково-сульфатних в'язучих значною мірою залежить від «*етрингітного каркасу*», що підкріплений C–S–H гелем.

Дослідження показують, що саме скупчення кристалів еtringіту та ущільнення пор гелями C–S–H обумовлюють високу міцність таких матеріалів.

Міцність на стиск і раннє тверднення. Компресійна міцність є одним із головних показників якості в'язучого. Для оптимальних складів на основі шлаку та ангідриту міцність може сягати $\sim 50\text{--}60$ МПа на 28-му добу тверднення.

Зокрема, у системі з $\sim 55\%$ GGBFS (шлаку), $\sim 35\%$ сульфату кальцію (ангідрит або гіпс) та лужним активатором (наприклад, Na_2CO_3 або NaAc) міцність після 28 діб становить понад 50 МПа.

Однак чисто шлакові системи без сульфатної добавки зазвичай досягають нижчої міцності ($\sim 30\text{--}40$ МПа), якщо не застосовано сильний лужний активатор.

Введення ж ангідриту прискорює початкову гідратацію шлаку за рахунок утворення еtringіту, що покращує ранню міцність. Наприклад, додавання $\sim 5\%$ ангідриту до шлакового в'язучого здатне підвищити міцність першої доби на $15\text{--}20\%$ (з $\sim 8\text{--}10$ МПа до $\sim 10\text{--}12$ МПа) за рахунок інтенсивного формування еtringіту в перші години тверднення.

Дослідження суперсульфатних цементів ($70\text{--}80\%$ шлаку + $5\text{--}20\%$ гіпсу/ангідриту + $<5\%$ лужного активатора) підтверджують, що навіть

невелика кількість портландцементу або вапна в ролі активатора разом із сульфатом забезпечує 1-денну міцність $\sim 9\text{--}10$ МПа.

Надалі інтенсивність наростання міцності зростає: так, за 28 діб міцність суперсульфатного в'язучого може перевищувати $50\text{--}60$ МПа, що на 20% вище, ніж у чистого портландцементу аналогічного класу.

Отже, ангідрит суттєво покращує раннє тверднення шлакових систем, забезпечуючи достатню початкову міцність для розформування та експлуатації виробів.

Вплив тонкодисперсних добавок. Структурна щільність і міцність в'язучого підвищуються при використанні ультрадисперсних мінеральних добавок. Зокрема, додавання $3\text{--}5\%$ ультратонко подрібненого алюмосилікатного наповнювача (наприклад, тонкомеленого аргіліту або алевроліту) збільшує міцність на стиск на $\sim 20\text{--}30\%$.

Ефект пояснюється дією дрібних частинок як центрів кристалізації: на їхній поверхні прискорено утворюються кристалічні гідрати сульфату кальцію (дигідрату), що ущільнюють структуру каменю.

Ультрадисперсні частинки також заповнюють поровий простір, зменшуючи загальну пористість на $8\text{--}10\%$ та підвищуючи середню густину каменю до $\sim 2.3\text{--}2.5$ г/см³ (проти ~ 2.1 г/см³ без добавки). Як наслідок, міцність на вигин зростає з ~ 5 МПа до $6\text{--}7$ МПа за рахунок покращення зчеплення між зернами та утворення більш щільної матриці.

Трикомпонентні (3С) в'язучі на основі метакаоліну. Окремо варто відзначити «*клинкер-вільні*» 3-компонентні в'язучі, що містять метакаолін, ангідрит II та гашене вапно. Оптимальним є співвідношення $\text{CaSO}_4:\text{Ca}(\text{OH})_2 \approx 1:1$ (наприклад, склад 61% метакаоліну, 19% ангідриту II і 18% вапна).

При гідратації такого складу утворюється етагідрат кальцію (етрингіт) та С–А–S–Н гелі, що забезпечують високу міцність і довговічність. Вже на 28-му добу компресійна міцність сягає ~ 45 МПа, а модуль пружності – $20\text{--}25$ ГПа, що перевищує показники традиційних шлакових в'язучих без сульфату кальцію. Важливо, що протягом тривалого тверднення структура залишається

стабільною – при оптимальному співвідношенні сульфату і вапна еtringіт не розкладається на пізніх стадіях, отже міцність лише зростає.

За даними довготривалих досліджень, через 1 рік міцність такого 3С-в'язучого може перевищувати 100 МПа без ознак деградації фаз.

Дисперсність ангідриту та оптимальний вміст. Розмір зерен сульфату кальцію помітно впливає на кінетику гідратації. Дрібніший ангідрит (наприклад, після додаткового помелу до площі поверхні $\sim 9000 \text{ см}^2/\text{г}$) швидше розчиняється у воді, забезпечуючи високий вміст SO_4^{2-} у розчині з самого початку.

Це призводить до інтенсивного утворення еtringіту в ранній період тужавіння і, як наслідок, до ущільнення структури без утворення шкідливих напружень.

Збільшення тонкості помелу в'язучого прискорює ступінь гідратації та покращує властивості матриці.

Встановлено, що оптимальний вміст ангідриту в шлаковому в'язучому залежить від наявності лужного активатора. У разі використання сильних активаторів (Na_2SO_4 , NaOH тощо) достатньо 4–6% CaSO_4 , щоб стабілізувати утворення еtringіту і забезпечити постійну міцність при довгому витримуванні.

Така мала добавка практично не впливає на довготривалу міцність (вона залишається стабільною або зростає), зате дещо знижує тепловиділення системи. Гідратація ангідриту є помірно екзотермічною – виділяється порядку 7–17 кДж/моль, що істотно менше теплотворності клінкерних мінералів.

Таким чином, додавання $\sim 5\%$ ангідриту не викликає перегріву при масивному бетонуванні і знижує ризик температурного тріщиноутворення.

Типові показники. У таблиці 5.3 наведено приклади механічних характеристик оптимальних складових в'язучого на 28-му добу тверднення. Як видно, при підборі складу можна досягти міцності 45–52 МПа та достатньої тріщиностійкості (міцність на вигин 5–6.5 МПа) при відносно невисокій пористості 12–18%.

Збільшення частки ангідриту (з 30% до 40%) дещо знижує міцність через надлишок сульфатів, що може призвести до формування більш пористої структури, проте введення ультратонких активних добавок (NaAc, мікрокремнезем, летюча зола) компенсує це, підвищуючи реакційну здатність системи.

Таблиця 5.4 – Механічні властивості шлаково-ангідритних в'язучих

Склад в'язучого	Міцність на стиск, МПа	Міцність на вигин, МПа	Загальна пористість, %	Густина, г/см ³
55% GGBFS + 35% ангідрит + 5% Na ₂ CO ₃	52	6.5	12	2.3
50% GGBFS + 40% ангідрит + 5% мікрокремнезем	48	5.8	15	2.1
60% GGBFS + 30% ангідрит + 5% летюча зола	45	5.2	18	2.0

(Примітка: GGBFS – гранульований доменний шлак; в усіх складах застосовано водоцементне відношення $w/b \approx 0.45$)

5.3.2 Довговічність, стійкість до агресивних середовищ та застосування в будівництві

Шлаково-ангідритні композиції формують щільну матрицю з дуже низькою проникністю, що є запорукою їхньої довговічності. Завдяки утворенню великої кількості C–S–H гелю і еtringіту заповнюється більшість капілярних пор діаметром 10–50 нм, суттєво знижуючи водопоглинання та дифузію агресивних іонів. Дослідження показують, що після 28 діб тверднення поровий простір такого в'язучого майже повністю складається з

дрібних пор <50 нм; з віком частка дрібних пор ще збільшується (на 90-й день ~89% пор має радіус <50 нм).

Сульфатостійкість матеріалу є відмінною: еtringіт, що утворився під час первинної гідратації, залишає мінімум алюмінатів у твердій фазі, тож вторинне утворення еtringіту (при дії зовнішніх сульфатів) не спричиняє руйнування. Навпаки, попередньо сформований еtringіт надає «вбудовану» стійкість до сульфатної корозії.

У розчинах, що містять агресивні сульфати (Na_2SO_4 , MgSO_4), шлаково-сульфатні в'язучі зберігають >95% початкової міцності навіть після тривалої експозиції, тоді як звичайний портландцемент може втрачати до 30%. Корозія від хлорид-іонів також уповільнюється: дрібнопориста структура значно ускладнює проникнення хлоридів. Відомо, що використання шлаку в цементі різко знижує коефіцієнт дифузії хлоридів порівняно зі звичайним бетоном.

Додатково, алюмінієві фази шлаку зв'язують хлориди у вигляді хлорокомплексів (входження Cl^- в гідротактити та монокальційсилікат-гідрати).

За оцінками, еквівалентний коефіцієнт проникності для хлорид-іонів у оптимальних шлакових композиціях становить лише $\sim 1 \times 10^{-13}$ – 1×10^{-14} м², що відповідає класу «дуже низька проникність».

Карбонізаційна стійкість шлакових цементів дещо нижча, ніж у ОРС, через понижений вміст $\text{Ca}(\text{OH})_2$, але в шлаково-ангідритних системах наявність еtringіту частково компенсує це, блокуючи пори. За нормальних умов карбонізація проникає не глибше 3–5 мм за місяць витримки (для порівняння, бетон на чистому ОРС може карбонізуватися на 5–8 мм за цей же період). Таким чином, за належного догляду карбонізація не становить критичної загрози для міцності матеріалу протягом експлуатації.

Морозостійкість та усадочне розтріскування. Завдяки низькій проникності та первинному об'ємному розширенню при формуванні еtringіту, шлаково-сульфатні системи демонструють високу морозостійкість.

Марки морозостійкості знаходяться на рівні F200–F300 (200–300 циклів заморожування-відтавання без помітного зниження міцності і маси).

Для порівняння, бетон на портландцементі без повітровтягування часто має морозостійкість F150 або нижче. Наявність у матриці еtringіту і гідротальциту запобігає надмірному розширенню води в порах: частина порового простору заповнена кристалогідратами, тому тиск льоду знижується. Крім того, шлакові цемента відомі дуже малою усадкою при твердненні. У порівняльних випробуваннях було виявлено, що зразки на суперсульфатному в'язучому мали усадку всього ~ 0.04 мм/м (0.004%) за 2 місяці тверднення на повітрі, тоді як бетон на портландцементі за цей час дав усадку ~ 0.55 мм/м (0.055%).

Така різюча різниця пояснюється компенсацією усадки утворенням еtringіту: об'єм утворених кристалів дещо перевищує об'єм вихідних речовин, тому вони «розпирають» структуру, запобігаючи її стиску при висиханні.

Як наслідок, в затверділому шлаково-ангидритному камені практично не виникає усадочних тріщин (виміряні деформації $< 0.01\%$ навіть при тривалій витримці).

Стійкість до агресивних середовищ. Композити на основі шлаку та сульфату кальцію вирізняються високою хімічною стійкістю в різних агресивних середовищах. В середовищах з підвищеною кислотністю вони поведуть себе краще за звичайний бетон: відсутність вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (який легко нейтралізується кислотами) уповільнює роз'їдання матриці.

Хлоридно-сульфатні середовища (морська вода, ґрунтові води) теж не викликають інтенсивної корозії: по-перше, відсутня реакція еtringітоутворення (він уже присутній), по-друге, низька проникність ускладнює дифузію агресивних іонів.

В результаті залізобетон на такому в'язучому має довший термін служби в морській воді і солончакових ґрунтах.

Також слід відзначити стійкість до підвищених температур: через низький вміст портландиту і щільну структуру шлакові в'язучі менше ризикують утворювати тріщини при нагріванні.

Після температурних впливів (нагрів 300–600°C) міцність алкалі-активованих шлакових бетонів знижується менше, якщо вони містять сульфатні добавки, що стабілізують матрицю.

Отже, шлаково-ангідритні в'язучі є перспективними для використання в умовах багатофакторної агресії – сульфатно-хлоридної корозії, змінних температур, чергування намокання-сушіння тощо.

Практичне застосування в будівництві. Розроблені в'язучі матеріали мають широкий потенціал застосування як екологічно дружня альтернатива портландцементу. Завдяки високій міцності (50+ МПа) та стійкості, їх можна використовувати у конструкційних бетонах відповідальних споруд.

Наприклад, бетон на основі суперсульфатного цементу вже досліджено для морських платформ і гідротехнічних споруд – він показав підвищену довговічність у морській воді без втрати міцності.

Також такі в'язучі підходять для підземних і тунельних конструкцій у агресивних ґрунтових водах, де звичайний цемент зазнає сульфатної корозії. Окрім того, швидкий набір міцності (10–15 МПа за добу) дозволяє застосовувати шлаково-ангідритні в'язучі в збірному залізобетоні та ремонтних складах швидкого тверднення. Системи з високим вмістом шлаку і гіпсу вже використовуються в технології саморозширних цементів для ґрунтоцементних паль і тампонажних розчинів: контрольоване розширення при твердненні забезпечує щільне заповнення порід без усадки. В цьому разі дозування ангідриту підбирають таким чином, щоб весь еtringіт утворився в перші 1–2 доби і не викликав внутрішніх напружень згодом.

Слід відзначити, що у деяких країнах (наприклад, Китай) суперсульфатний цемент нормований як окремий різновид в'язучого, придатного для масового застосування в будівництві завдяки використанню промислових відходів та зниженому тепловиділенню.

З огляду на високу тріщиностійкість (за рахунок малої усадки) такі цементи цікаві для виробництва масивних монолітних плит і фундаментів.

В цілому, результати дослідження підтверджують, що розроблені шлаково-ангідритні в'язучі можуть забезпечити підвищену довговічність та надійність залізобетонних конструкцій, особливо в умовах агресивних середовищ, сприяючи продовженню строку їх служби без додаткового захисту.

5.3.3 Екологічна оцінка

Розроблені безклінкерні в'язучі матеріали мають значні екологічні переваги у порівнянні з традиційним цементом. Нижче підсумовано основні «зелені» аспекти цих в'язучих:

- Суттєве зниження викидів CO₂. Виробництво портландцементу пов'язане з викидами ~800–900 кг CO₂ на 1 тону клінкеру через випал вапняку та високі енерговитрати. Натомість шлаково-ангідритні в'язучі взагалі не потребують випалу – всі компоненти отримані як побічні продукти інших виробництв і піддаються лише помолу. Це зменшує вуглецевий слід в'язучого на 70–80% порівняно з ОРС. Суперсульфатні цементи відомі як матеріали з низьким вмістом вуглецю та малою енергоємністю, тому їх впровадження сприяє скороченню викидів парникових газів у цементній галузі.
- Утилізація промислових відходів. Основні компоненти в'язучого – гранульований доменний шлак та фосфогіпс/ангідрит – є масовими відходами металургійної і хімічної промисловості.

Використання їх у якості цементуючих матеріалів вирішує одразу дві проблеми: зменшує потребу у видобутку природної сировини (вапняку, гіпсового каменю) і ліквідує накопичення відходів на полігонах. Наприклад, у світі щороку утворюється десятки мільйонів тонн фосфогіпсу, який здебільшого складається, забруднюючи довкілля. Включення його до складу

в'язучих (після необхідної обробки для видалення шкідливих домішок) перетворює відходи на цінну вторинну сировину. Те ж саме стосується доменного шлаку – його застосування в цементі вже є класичним прикладом кругової економіки, коли відхід металургії заміщує до 70% цементу в бетоні.

- Низьке тепловиділення та енергоефективність. При твердненні шлаково-ангідритних в'язучих виділяється значно менше тепла, ніж при гідратації портландцементу. Це зменшує потребу в охолодженні масивних конструкцій і запобігає термічним тріщинам.

Крім того, сам процес виробництва в'язучого потребує менше енергії: немає стадії випалу при 1450°C, а тільки помел шлаку та сульфату, що є менш енерговитратним. Таким чином, сумарне енергоспоживання на тону готового в'язучого знижується на порядок, що опосередковано зменшує і викиди від енергетики.

- Мінімізація забруднення та безпека. Використання «відходових» компонентів у цементі зменшує обсяги їхнього зберігання, а отже й ризики забруднення ґрунтів і вод. Наприклад, утилізація фосфогіпсу у в'язучому скорочує вимивання з нього токсичних домішок (фторидів, фосфатів) у довкілля.

Більш того, сама цементна матриця здатна зв'язувати небезпечні елементи. Встановлено, що важкі метали (As, V, Mn тощо), присутні у промвідходах, ефективно іммобілізуються в структурі еtringіту та C–S–H-гелю і не вилугуюються з твердого каменю.

Стійкість та довговічність як внесок у екологію. Бетони на основі розроблених в'язучих мають підвищений строк експлуатації завдяки високій стійкості до корозії. Це опосередковано приносить екологічну користь – продовження ресурсу споруд означає меншу потребу у їхньому ремонті або реконструкції, а відтак скорочення витрат матеріалів і енергії в довгостроковій перспективі.

Стійкість до морозу та агресивних іонів забезпечує збереження бетонних конструкцій без додаткових хімічних захисних покриттів, що теж

зменшує екологічне навантаження (менше використання полімерів, органічних розчинників тощо для захисту).

Таким чином:

Шлаково-ангідритні в'язучі показали комплекс високих експлуатаційних характеристик – міцності, довговічності та хімічної стійкості – при значно меншому екологічному впливі порівняно з традиційним цементом. Отримані результати дослідження підтверджують, що оптимізація складу (співвідношення шлаку, сульфатів і лужних компонентів) дозволяє досягнути міцності 50–60 МПа на 28 добу без втрати показників у довготривалій перспективі.

Матеріал характеризується низькою пористістю (<15%) та незначною усадкою, що гарантує відсутність тріщин і високу морозостійкість. В агресивних середовищах (сульфати, хлориди, волога) нові в'язучі не лише не поступаються портландцементу, а й перевершують його за рахунок відсутності вразливих фаз та наявності захисних еtringітних утворень.

З точки зору екології, використання таких безклінкерних в'язучих сприяє сталому розвитку: зменшує викиди CO₂ та споживання енергії, вирішує проблему утилізації відходів і знижує потребу у видобутку природної сировини.

Таким чином, розроблені шлаково-ангідритні в'язучі можуть розглядатися як ефективна та екологічно безпечна альтернатива традиційним цементам, відкриваючи шлях до більш сталого й довговічного будівництва.

ВИСНОВКИ

1. У межах дипломної кваліфікаційної роботи, присвяченої проектуванню та організації будівництва промислової будівлі у м. Запоріжжя. Проект має комплексний характер і поєднує інженерні, технологічні та матеріалознавчі рішення, спрямовані на забезпечення надійності та ефективності промислового будівництва. Науково-дослідницький розділ орієнтований на дослідження властивостей шлакових в'язучих та можливостей їх удосконалення за рахунок використання ангідридів.

2. У науково-дослідницькому розділі виконано аналіз механізмів взаємодії шлакових в'язучих з ангідридами та їх впливу на процеси гідратації і тверднення. Показано, що введення ангідридів у склад шлакових в'язучих змінює характер перебігу гідратаційних реакцій, сприяє формуванню більш щільної структури цементного каменю та впливає на фізико-механічні властивості матеріалу.

3. Розглянуто роль сульфатних, борних і фосфорних ангідридів як модифікувальних компонентів, що дозволяють регулювати строки тужавіння та властивості затверділого матеріалу. Встановлено, що застосування таких в'язучих сприяє раціональному використанню промислових відходів, зниженню енергоємності виробництва будівельних матеріалів та підвищенню довговічності конструкцій.

4. Отримані результати дозволяють обґрунтувати можливість цілеспрямованого регулювання структури і властивостей шлакових в'язучих шляхом вибору типу та кількості ангідридних добавок. Практична значущість виконаних досліджень полягає у можливості застосування шлакових в'язучих з ангідридами у промисловому будівництві, зокрема при зведенні об'єктів із підвищеними вимогами до довговічності та експлуатаційної надійності. Отримані висновки можуть бути використані при розробці складів нових будівельних матеріалів, а також слугувати основою для подальших досліджень у галузі будівельного матеріалознавства.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ Б А.2.4-6:2009 Правила виконання робочої документації генеральних планів, – 30с.
2. ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва», К.: Мінрегіон України, 2017, – 47с.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія [Чинний від 01.11.2011], 80с. (Інформація та документація).
4. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 01.09.2022]. Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (ДП «ДНДІБК»), 23с. (Інформація та документація).
5. ДСТУ 9191:2022 Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель [Чинний від 01.03.2023]. ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 60с. (Інформація та документація).
6. ДСТУ EN 14351-1:2020 Вікна та двері. Вимоги. Частина 1. Вікна та зовнішні двері (EN 14351-1:2006 + A2:2016, IDT)
7. ДСТУ 8855:2019 Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності) [Чинний від 01.12.2019]. Технічний комітет стандартизації «Експертиза містобудівної та проектної документації на будівництво» (ТК 319), 19с. (Інформація та документація).
8. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Залізобетонні та кам'яні конструкції» (для слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.06010101 – «Промислове та цивільне будівництво») / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова; уклад.: Є. С. Сєдишев. – Х.: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2013. – 50 с.
9. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011, 71с.

10. Методичні вказівки до виконання з дисципліни «Залізобетонні та кам'яні конструкції». Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: Є. Г. Стоянов, Н. О. Псурцева. – Х.: ХНУМГ, 2014. – 35 с.

11. Конспект лекцій з курсу «Проектування залізобетонних конструкцій» (для студентів 4 і 5 курсів всіх форм навчання напряму підготовки 6.060101 / Є. Г. Стоянов, Н. О. Псурцева; Харків. НУ міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 105с.

12. ДСТУ 3760:2019 Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови, 28с.

13. Організація будівництва/ С.А. Ушацький, Ю.П. Шейко, Г.М. Тригер та ін.; За редакцією С.А. Ушацького. 0-64 Підручник. – К.: Кондор, 2007. – 521 с.

14. Організація будівельного виробництва: навчальний посібник / А. М. Дорош. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 255 с.

15. Система проектної документації для будівництва. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів: ДСТУ Б В.1.2-3:2006. – [Чинний від 1 січня 2007]. – К. : Держстандарт України, 2007. – 14 с. – (Національні стандарти України).

16. ДБН А.3.1-5:2016 Організація будівельного виробництва, 62с.

17. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою», К.: Мінрегіон України, 2016. – 66с.

18. ДСТУ Б В.2.8-43:2011 Огородження інвентарних будівельних площ і ділянок виконання будівельно-монтажних робіт. Технічні умови (ГОСТ 23407-78, MOD), К.: Мінрегіон України, 2012. – 12с.

19. Кошторисні норми України. Настанова з визначення вартості будівництва, 57с.

20. Конспект лекцій дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі», змістовний модуль «Цивільний захист», для студентів усіх спеціальностей та всіх форм навчання / Укл.: М. О. Журавель – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка». Каф. ОП і НС, 2020 р. – 49 с.

21. Залізобетонні конструкції. Методичні рекомендації до практичних занять для студентів напряму підготовки 6.060101 Будівництво/ В.Є. Волкова. – Д.: ДВНЗ Національний гірничий університет, 2013. – 25 с
22. ДБН В.2.2-5:2023 Захисні споруди цивільного захисту, 131 с.
23. ДСТУ Б А.3.2-13:2011 Система стандартів безпеки праці. Будівництво. Електробезпечність. Загальні вимоги, К.: Держбуд України, 2012. – 14с.
24. ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення», К.: Мінрегіон України, 2018. – 137с.
25. ДСТУ Б А.3.2-15:2011 «Норми освітлення будівельних майданчиків (ГОСТ 12.1.046-85, MOD)», К.: Мінрегіон України, 2012. – 31с.
26. ДБН А.3.2-2-2009 «Охорона праці і промислова безпека у будівництві», К.: Держбуд України, 2012. – 202с.
27. Конспект лекцій з курсу «Безпека праці в будівництві». Заїченко В. І. 2014 – 97с.
28. ДСТУ 2293:2014 «Охорона праці. Термини и визначення основних понять», Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та
29. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження та впливи: ДБН В.1.2-2:2006.
30. ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків»2016, 110 с.
31. Magallanes-Rivera R.X., Escalante-García J.I. Hemihydrate or waste anhydrite in composite binders with blast-furnace slag: Hydration products, microstructures and dimensional stability // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 71. P. 317–326. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.054.
32. Wang J., Lyu X., Wang L., Cao X., Zang H., Liu Q. Effect of Anhydrite on the Hydration of Calcium Oxide-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag Binders // Science of Advanced Materials. 2017. Vol. 9. P. 2214–2222. DOI: 10.1166/sam.2017.3248.
33. Wang Y., Hu Y., He X., Su Y., Strnadel B., Miao W. Hydration and compressive strength of supersulfated cement with low-activity high alumina

ferronickel slag // Cement and Concrete Composites. 2023. Vol. 136. Article 104892. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104892.

34. Назаренко О.М.// Актуалізація розробки технологічного процесу використання техногенних відходів в будівельному виробництві // С.І.Ломовацький, А.О.Березовська, О.С.Іщенко, М.В.Кулік, Н.С.Сторчай. НУВГП, Рівне, 2022, 44 вип. С.68-76

35. Назаренко О.М., Березовська А.О., Залевський В.І., Іщенко О.Л., Клітній О.Г. Варіювання технологічних схем виробництва пуцоланових композицій // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2024. № 46. С. 382–388. DOI: 10.31713/budres.v0i46.44.

36. Kryvenko, P., Rudenko, I., & Konstantynovskyi, O. (2020). Розробка шлакового цементу, активованого Na(K) солями сильних кислот, для бетонів армованих сталеву арматурою. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(6 (108)), 26–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217002>

37. О. В. Христич, «Дрібнозернисті заповнювачі асфальтобетонних сумішей з продуктів ресайклінгу будівельного лому», *СучТехнБудів*, вип. 35, вип. 2, с. 49–55, Груд 2023.

38. Саницкий, М., Марущак, У., & Олевич, Ю. (2018). Надшвидкотверднучі портландцементні композиції для високофункціональних бетонів. Будівельні матеріали та виробы, (3-4(98)), 28–31. <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2018-98-02>

39. Cabrera-Luna K., Burciaga-Diaz O., Santana-Carrillo J.L., Escalante-Garcia J.I. Environmental performance of sustainable supersulfated cements based on blast furnace slag: A life cycle study. Environmental Research. 2025. Vol. 279, Part 2. Article 121876. ISSN 0013-9351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121876>

40. Yoon, S.; Park, H.; Yum, W.S.; Suh, J.-I.; Oh, J.E. Influence of Calcium Sulfate Type on Evolution of Reaction Products and Strength in NaOH- and CaO-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Appl. Sci. 2018, 8, 2500. <https://doi.org/10.3390/app8122500>