

Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою
Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему:

«АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРИСКОРЕННЯ ТЕРМІНІВ ТВЕРДІННЯ БЕТОНУ»

Виконав:	В.В. Євтеєв
студент групи 601-БТ	
спеціальності 192 – будівництво та	
цивільна інженерія, ОП «Технології	
будівельних конструкцій, виробів і	
матеріалів»	
Керівник	О.М. Гукасян
Завідувач кафедри	О.В. Семко
Рецензент	Ю.О. Побуховська

Полтава 2026

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	6
1.1 Основні відомості про портландцемент	6
1.2 Хімічний і мінералогічний склад клінкеру портландцементу	7
1.3 Особливості гідратації клінкерних мінералів і портландцементу	10
1.4 Процес твердіння бетону	14
1.5 Методи контролю формування структури в'язучих речовин	16
1.6 характеристики добавок для важких бетонів	18
1.7 Добавки для прискорення твердіння бетону	23
1.8. Особливості структуроутворення цементних систем з високодисперсна мінеральна добавка (СРН)ми	26
РОЗДІЛ 2. МЕТА РОБОТИ	28
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	29
3.1 План експерименту	29
3.2 Методика приготування	32
3.3 Кількість добавки	33
3.4 Визначення оптимальної консистенції цементного тіста	34
3.6 Дослідження міцнісних характеристик	35
РОЗДІЛ 4 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ	41
4.1 Портландцемент	41
4.2 Вода	42
4.3 Добавки	43
Таблиця 4.5	45
Хлоридна (соляна) кислота	46
РОЗДІЛ 5 ПОЯСНЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	47
5.1 Оптимізація складу комплексної хімічної добавки	47
5.1.1 Закономірності впливу хімічних добавок на тужавлення і міцність цементу	48
5.2 Створення методики приготування мінеральної добавки	52
5.2.1 Вплив складу добавок на тривалість тужавлення портландцементу	55

5.2.2 Вплив складу добавок на тривалість тужавлення портландцементу (1 доба)	59
5.2.3 Вплив складу добавок на тривалість тужавлення портландцементу (2 доби)	69
5.2.4 Залежність міцності ПЦ від вмісту добавки (у віці 7 діб)	72
5.2.5 Вплив добавки на міцність цементу (28 діб)	80
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....	88
6.1. Бетонні роботи.....	88
6.2. Виконання будівельних робіт	89
6.3. Вимоги до робочих місць	91
РОЗДІЛ 7 ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	94
ЛІТЕРАТУРА	94

ВСТУП

Бетон як будівельний матеріал отримав настільки широке застосування, що загальновідомим є факт: він являє собою штучний кам'яний матеріал, сформований із раціонально підбраної суміші в'язучої речовини, води, дрібного та крупного заповнювача [1, 2].

Практичний досвід використання бетону та залізобетонних виробів у всіх напрямках будівельної галузі підтверджує, що ефективність їх роботи та надійність визначаються не лише якістю самого матеріалу, а й особливостями його функціонування у складі конструкцій і споруд [3].

Урахування зазначених факторів є необхідним під час вибору вихідних даних для проектування раціональних складів бетону, які в подальшому повинні забезпечувати оптимальне поєднання його властивостей, необхідних для практичного застосування. Незважаючи на те, що питання підбору складів бетону є достатньо поширеним і ґрунтовно дослідженим, упродовж усього розвитку науки про бетон воно залишається однією з найбільш актуальних проблем вивчення властивостей бетонів і сьогодні [1].

Основним компонентом будь-якого бетону є в'язуча речовина, характеристики якої значною мірою визначають фізико-механічні властивості матеріалу. За видом в'язучого найбільш поширеними є цементні бетони, однак у будівельній практиці також застосовують силікатні, гіпсові, полімерцементні, шлаколужні та полімерні бетони [4]. Найбільшого використання набули саме цементні бетони, які характеризуються здатністю тверднути та нарощувати міцність як у повітряному середовищі, так і у воді, достатньою стійкістю до дії агресивних середовищ, а також універсальністю формування конструкцій різного призначення [2, 5].

Водночас для цілеспрямованого регулювання властивостей бетонної суміші та затверділого бетону до їх складу вводять хімічні добавки. Згідно з чинними нормативними документами, добавки застосовують для зміни строків тужавіння, підвищення рухливості суміші, прискорення або уповільнення процесів твердіння, підвищення міцності, морозостійкості та

довговічності бетону, а також для надання спеціальних експлуатаційних властивостей [6, 7].

До сучасного бетону висувається комплекс підвищених вимог, виконання яких у багатьох випадках є неможливим без використання модифікаторів і пластифікаторів – хімічних добавок, що забезпечують відповідність бетонних сумішей вимогам як проєктувальників, так і виконавців будівельних робіт [6].

У сучасній технології бетону простежується чітка тенденція до створення та застосування добавок із поліфункціональною дією. Такі добавки одночасно впливають на кілька показників бетону, зокрема на строки тужавіння, рухливість бетонної суміші, інтенсивність набору міцності, корозійну стійкість і довговічність матеріалу [7].

Сфера застосування значної частини сучасних добавок не обмежується лише бетонами – вони ефективно використовуються також для покращення властивостей цементно-піщаних розчинів різного призначення [4].

З точки зору будівельної практики найбільш раціональною є бетонна суміш, яка поєднує високу рухливість, регульовані строки тужавіння, інтенсивний набір ранньої міцності, універсальність застосування та можливість отримання конструкцій із підвищеною водонепроникністю. Водночас ключовим завданням залишається забезпечення необхідної міцності та довговічності бетонних конструкцій, тобто їх здатності протягом тривалого часу протистояти механічним навантаженням, а також фізичним і хімічним впливам навколишнього середовища [3, 5].

Застосування модифікаторів бетону є доцільним як з технологічної, так і з економічної точки зору. Використання хімічних добавок дає змогу зменшити енерговитрати на укладання бетонної суміші, скоротити витрату цементу, зберегти необхідну рухливість бетону, підвищити довговічність конструкцій, а також забезпечити високі показники ранньої та кінцевої міцності матеріалу [6, 7].

РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Основні відомості про портландцемент

Портландцемент є гідравлічною в'язучою речовиною, яку отримують шляхом спільного тонкого подрібнення цементного клінкеру з гіпсом або іншими мінеральними високодисперсна мінеральна добавка (СРН)ми відповідно до вимог чинних нормативних документів [8, 9].

Перший патент на виробництво штучного каменю під назвою портландцемент був отриманий у 1824 році Джозефом Аспдіном. За тривалий період розвитку цементної промисловості якість портландцементу суттєво зросла, а середні показники його міцності збільшилися майже у десять разів. Це стало можливим не лише завдяки вдосконаленню технологій виробництва, але й у результаті оптимізації складу сировинної суміші для одержання клінкеру. У сучасному будівництві портландцемент є основним в'язучим матеріалом для виготовлення бетонів, залізобетонних конструкцій і будівельних розчинів [10].

Портландцементний клінкер одержують шляхом випалювання сировинної суміші до стану спікання за температури близько 1450 °С, що забезпечує формування переважно високоосновних силікатів кальцію. Гіпс вводять до складу цементу з метою регулювання строків тужавлення та стабілізації процесів гідратації, що позитивно впливає на формування міцнісних характеристик матеріалу [8, 11].

Для виготовлення портландцементного клінкеру застосовують сировинну суміш, яка приблизно на 75 % складається з карбонатних порід і на 25 % – з алюмосилікатних матеріалів. Як карбонатну складову використовують вапняки, крейду, вапняки-черепашники та вапнякові туфи. Алюмосилікатним компонентом, як правило, є глини, а також, за економічної доцільності, леси, суглинки, аргіліти й глинисті сланці. Крім того, як основну сировину можуть застосовувати природні суміші вапняків із глинами – мергелі [10, 12].

Серед побічних продуктів, придатних для виробництва портландцементного клінкеру, найбільш поширеними є доменні гранульовані шлаки. Завдяки своєму хімічному складу (SiO_2 – 38...40 %, CaO – 43...44 %, Al_2O_3 – 5...14 %) вони можуть частково замінювати глинисту або карбонатну складові сировинної суміші. Для коригування складу шихти також застосовують електротермофосфорні шлаки, паливні золи, відходи вуглезбагачення та різні види промислових шлаків, зокрема нефеліновий (білітовий), монокальцієвий і червоний [11, 13].

1.2 Хімічний і мінералогічний склад клінкеру портландцементу

Під час випалювання сировинної суміші в ній відбуваються складні фізичні та фізико-хімічні процеси, у результаті яких матеріал спікається і формуються зерна клінкеру розміром приблизно 20...30 мм. При цьому мінералогічний і хімічний склад отриманого клінкеру істотно відрізняється від складу початкової сировини [8, 10].

Хімічний склад клінкеру характеризується вмістом чотирьох основних оксидів, мас. %: Fe_2O_3 – 2...4; Al_2O_3 – 4...9; SiO_2 – 20...24; CaO – 63...67. Сукупний вміст цих компонентів становить 95...97 %. Крім них, у невеликих кількостях, залежно від виду використаної сировини, у клінкері присутні MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 та інші сполуки. Під час оцінювання якості клінкеру враховують не лише загальний вміст оксидів, але й ступінь зв'язування CaO та SiO_2 [10, 14].

Присутність оксиду кальцію CaO у складі клінкеру за умови його повного зв'язування в силікатні та алюмосилікатні сполуки забезпечує високу міцність і швидкий набір твердості цементу [8].

Оксид кремнію SiO_2 вступає у взаємодію з CaO з утворенням силікатів, здатних до гідралічного твердіння. Підвищення вмісту SiO_2 у клінкері призводить до уповільнення тужавіння і твердіння, однак такі цементи відзначаються високою міцністю на пізніх строках твердіння. Їх відносять до

цементів з помірним тепловиділенням, які мають підвищену водо- та сульфатостійкість [11, 15].

Збільшення частки оксиду алюмінію Al_2O_3 у складі клінкеру викликає прискорене тужавіння і швидке нарощування міцності цементу, проте водночас погіршує його сульфатостійкість і морозостійкість [10].

Оксид заліза Fe_2O_3 виконує не лише роль барвника, а й діє як плавень, що покращує процес спікання клінкеру. Цементи з підвищеним вмістом Fe_2O_3 та зниженим вмістом глинозему відзначаються достатньо високою сульфатостійкістю, а за швидкістю набору міцності вони наближаються до висококремнеземистих цементів [14].

Оксиди калію та натрію несприятливо впливають на процеси гідратації цементу і спричиняють появу висолів на поверхні виробів. Крім того, луги можуть взаємодіяти з активним кремнеземом заповнювачів, що призводить до надмірного розширення та руйнування бетонів і будівельних розчинів. Тому в цементах, зокрема для гідротехнічних споруд, вміст лужних оксидів не повинен перевищувати 0,6 % у перерахунку на $Na_2O_{екв}$ [9, 16].

Під час випалювання сировинної суміші до стану спікання за температури близько $1450\text{ }^\circ\text{C}$ формуються чотири основні мінеральні фази цементного клінкеру: трикальцієвий силікат $3CaO \cdot SiO_2$ (аліт), двокальцієвий силікат $2CaO \cdot SiO_2$ (беліт), трикальцієвий алюмінат $3CaO \cdot Al_2O_3$ та чотирикальцієвий алюмоферит $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$. У скороченому позначенні ці фази записують як C_3S , C_2S , C_3A і C_4AF відповідно. Слід зазначити, що зазначені фази є твердими розчинами, склад і структура яких визначаються складом сировинної суміші, тонкістю помелу та режимом термічної обробки [8, 11].

Частка основних мінералів у портландцементному клінкері може змінюватися в таких межах, %: C_3S – 45...60; C_2S – 20...30; C_3A – 4...14; C_4AF – 10...18. Окрім кристалічних фаз, у складі клінкеру також виявляють периклаз MgO , вільний оксид кальцію CaO та клінкерне скло змінного складу, збагачене Al_2O_3 та Fe_2O_3 [10, 14].

Аліт C_3S є провідною фазою клінкеру та являє собою твердий розчин, модифікований іонами Mg^{2+} , Al^{3+} і Fe^{3+} . Його кристали мають пластинчасту або шестикутну форму. Аліт інтенсивно взаємодіє з водою і визначає формування міцності цементного каменю, особливо на початкових етапах твердіння [8, 11].

Беліт C_2S , як правило, перебуває у β -модифікації. Ця фаза повільно вступає в реакцію з водою і практично не впливає на міцність цементного каменю на ранніх стадіях гідратації. Проте в пізні строки твердіння, після приблизно одного року, міцність зразків, отриманих із гідратованого в однакових умовах аліту і беліту, є майже однаковою [10, 15].

Силікатні мінерали становлять близько 75% клінкеру, тоді як решта приблизно 25% припадає на так звану проміжну фазу, що заповнює простір між кристалами аліту і беліту. Ця частина може бути представлена кальцієвими алюмоферитами, кристалами C_3A та клінкерним склом, яке не встигло закристалізуватися. Вміст склоподібної фази залежить від швидкості охолодження клінкеру і може змінюватися в межах від 1 до 22%; у нормально охолоджених клінкерах зазвичай утворюється близько 6...12% скла. Склоподібна фаза має змінний склад і завжди містить певну кількість оксидів Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Na_2O та K_2O .

Фізико-механічні властивості цементу визначаються не лише мінералогічним складом клінкеру, а й розмірами та формою кристалів окремих мінералів. Найбільш сприятливою є дрібнокристалічна структура, яка формується за умов швидкого охолодження клінкеру.

Трикальцієвий алюмінат C_3A є фазою кубічної сингонії, структура якої змінена присутністю іонів Si^{4+} , Fe^{3+} , Na^+ і K^+ . У клінкері він присутній як проміжна речовина у вигляді складних твердих розчинів, що дуже швидко гідратуються і тверднуть, утворюючи штучний камінь невисокої міцності. Вміст C_3A може бути причиною розвитку сульфатної корозії бетону.

Чотирикальцієвий алюмоферит C_4AF є феритною фазою, модифікованою різними іонами, і входить до складу клінкеру як одна з

проміжних складових.

Оксид магнію гідратується повільно з утворенням $Mg(OH)_2$, що супроводжується збільшенням об'єму. Якщо його кількість у клінкері перевищує 5%, це може призводити до нерівномірних об'ємних змін цементу і появи тріщин у бетоні.

Вільний оксид кальцію в клінкері допускається у кількості не більше 1%, оскільки його перетворення на гідроксид кальцію $Ca(OH)_2$ викликає нерівномірні об'ємні деформації та руйнування будівельного розчину або бетону.

Залежно від мінералогічного складу портландцемент поділяють на такі типи: високоалітовий (більше 60%); алітовий (від 50 до 60%); белітовий (більше 35%); алюмінатний (більше 12%); алюмоферитний.

1.3 Особливості гідратації клінкерних мінералів і портландцементу

Основу цементувальної складової портландцементу утворюють гідратовані сполуки вихідних компонентів. При цьому кількість гідратних утворень значно перевищує число тих, які безпосередньо визначають процес твердіння неорганічних матеріалів [10, 14].

Портландцемент, з одного боку, містить такі мінерали, як C_3S , C_2S , C_4AF і $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, а з іншого – кристалічну та склоподібну фази. У процесі помелу цемент додатково збагачують мінеральними високодисперсна мінеральна добавка (СРН)ми, а клінкер характеризується наявністю домішок, у зв'язку з чим перебіг процесів твердіння є складним і багатокомпонентним [8, 11].

Під час змішування цементу з водою відбувається його гідратація, у результаті якої цементне тісто поступово втрачає плинність, тужавіє та згодом твердне з утворенням штучного – цементного – каменю [14, 15].

Тужавлення портландцементного тіста характеризується втратою пластичних властивостей без істотного зростання міцності сформованого цементного каменю [8].

Процес твердіння зумовлюється сукупністю хімічних, фізико-хімічних і фізичних явищ, що відбуваються під час взаємодії мінералів цементного клінкеру з водою та супроводжуються формуванням просторової структури й поступовим зростанням міцності цементного каменю в часі [10, 14].

У процесі взаємодії цементу з водою розрізняють первинні та вторинні реакції. До первинних належать хімічні взаємодії вихідних клінкерних мінералів з водою, тоді як до вторинних – реакції між продуктами гідратації, а також їх взаємодія з гіпсом, неорганічними солями та іншими компонентами цементної системи [11].

На сьогодні накопичено значний обсяг наукових даних щодо механізмів твердіння цементу. На їх основі розроблено та впроваджено у практику виробництва бетону технологічні прийоми, що дають змогу цілеспрямовано регулювати перебіг гідратації цементу та формування експлуатаційних властивостей бетонів [15, 16].

Аліт під час гідратації утворює гідросилікати кальцію та портландит відповідно до реакції:

$$2(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 6\text{H}_2\text{O} = 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 \quad [14].$$

На процес гідратації C_3S , як і інших мінералів цементного клінкеру, істотно впливають температура, розмір кристалів і, у певних випадках, склад продуктів гідратації. Зміна температури безпосередньо відображається на ступені гідратації. Так, за нормального водотвердого співвідношення через 12 годин ступінь гідратації C_3S за температури 5°C практично дорівнює нулю, при 20°C становить близько 30 %, а при 50°C досягає приблизно 60 % [14, 17].

За гідротермальних умов гідратації C_3S склад продуктів реакції змінюється. У температурному інтервалі $80\text{--}120^\circ\text{C}$ кінцевим продуктом гідратації є $\text{C}_2\text{SH}(\text{B})$; за температур $120\text{--}175^\circ\text{C}$ утворюються $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ і $\text{Ca}(\text{OH})_2$; у межах $175\text{--}200^\circ\text{C}$ формується суміш C_2SH_2 , $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$, $\text{C}_2\text{SH}(\text{C})$ і $\text{Ca}(\text{OH})_2$. За температур, що перевищують 200°C , первинно утворені фази $\text{C}_2\text{SH}(\text{C})$ і $\text{Ca}(\text{OH})_2$ переходять у стабільну фазу C_3SH_2 [14, 18].

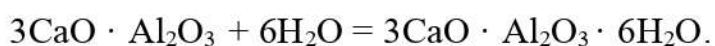
На швидкість гідратації C_3S істотно впливають електроліти та органічні добавки. Значне прискорення процесу викликають хлориди, броміди, сульфати, нітрати та хромати лужних і лужноземельних металів. Уповільнюючу дію мають $Ca(OH)_2$, а також фториди, фосфати та солі, катіони яких утворюють малорозчинні гідроксиди. Більшість органічних добавок також сповільнює гідратацію. Прискорювальний ефект домішок пов'язують зі скороченням індукційного періоду внаслідок інтенсивнішого зародження нових фаз, тоді як уповільнення зумовлене гальмуванням процесів їх кристалізації [11, 15].

Двокальцієвий силікат у складі клінкеру перебуває переважно у метастабільній β -формі, стабілізованій домішками. Порівняно з C_3S швидкість гідратації β - C_2S є значно меншою [10, 14].

Беліт гідратується з утворенням тих самих продуктів, що й аліт, проте в інших кількісних співвідношеннях, відповідно до реакції:
 $2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O = 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$ [14].

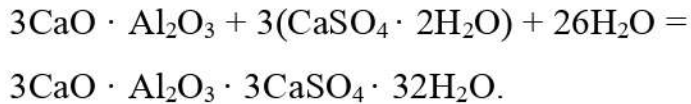
Під час гідратації C_2S у температурному інтервалі 80–120 °C формуються ті самі продукти, що й за нормальних умов. У діапазоні 120–180 °C первинно утворюється C_2SH_2 , який з часом переходить у $C_2SH(A)$, а за тривалої витримки або підвищення температури трансформується в $C_2SH(C)$ [18].

Гідравлічна активність кальцієвих алюмінатів пояснюється тим, що іони Al^{3+} у їхній кристалічній структурі перебувають у термодинамічно нестійкій чотирьохкоординаційній формі. Здатність алюмінатів і алюмоферитів до утворення гідроксильних груп виражена значно сильніше, ніж у силікатів, що зумовлено меншою міцністю зв'язків у тетрадрах $[AlO_4]^{5-}$ порівняно з тетрадрами $[SiO_4]^{4-}$ [14, 17].



У випадку введення гіпсу як добавки під час гідратації кальцієвого алюмінату можливе також утворення еtringіту. Цей процес відбувається внаслідок взаємодії трикальцієвого алюмінату з гіпсом і водою за такою

реакцією:



Гідратація цементу. Після змішування цементу з водою спочатку формується пухка коагуляційна структура, яка характеризується тиксотропними властивостями. У процесі перемішування цементного тіста контакти, що утворюються між гідратними новоутвореннями колоїдних частинок цементу, руйнуються, унаслідок чого тісто зберігає свою рухливість [14, 17].

Чим довше триває гідратація, тим більше утворюється гідратних продуктів і тим вищою стає щільність структури. Період, упродовж якого формується безперервна коагуляційна структура, що постійно ущільнюється, називають періодом тужавіння, тобто стадією формування структури. Тужавіння цементу розглядають як початкову стадію загального процесу твердіння [8, 15].

Реакції гідратації починаються відразу після контакту цементу з водою. Уже через кілька хвилин розчин, що заповнює простір між зернами цементу, стає перенасиченим відносно сульфату та гідроксиду кальцію, які виділяються внаслідок гідролізу аліту. Високий вміст іонів кальцію та сульфат-іонів у цементному тісті зберігається протягом певного часу, тривалість якого залежить від кількості лугів у цементі: чим більший їх вміст і чим раніше вони починають розчинятися, тим швидше зменшується перенасичення розчину щодо іонів кальцію [14, 18].

Окрім кальцієвих і сульфатних іонів, у поровому просторі цементного тіста також присутні іони алюмінію, заліза та кремнію. Концентрації цих іонів не залишаються сталими, а змінюються в міру зростання ступеня гідратації цементу, що істотно впливає на кінетику кристалоутворення та формування мікроструктури цементного каменю [17, 19].

Оскільки основним мінералом портландцементного клінкеру є аліт, у процесі гідратації цементу, так само як і при гідратації аліту, виділяють

доіндукційний, індукційний та постіндукційний періоди, хоча в багатокомпонентній цементній системі вони проявляються менш чітко, ніж у випадку гідратації чистого C_3S [14, 18].

Часовий інтервал, протягом якого кристалоутворення відбувається за відносно стабільної концентрації іонів у розчині, визначають як індукційний (прихований) період. Його тривалість може змінюватися під впливом фізичних факторів, зокрема механічних коливань, інтенсивного перемішування, а також дії силових полів і випромінювань. Експериментальні дослідження підтверджують, що такі впливи активізують процеси зародження кристалів, причому оптимальна інтенсивність дії залежить від ступеня пересичення розчину. Перебіг процесу істотно визначається також концентрацією іонів, наявністю сторонніх домішок та температурними умовами [17, 19].

Температурні умови навколишнього середовища мають істотний вплив на гідратаційні процеси як цементу загалом, так і окремих клінкерних мінералів. За знижених температур швидкість гідратації істотно зменшується, а при температурах нижче $-10\text{ }^\circ\text{C}$ процес майже припиняється. При цьому механізм гідратації принципово не змінюється, однак індукційний період значно подовжується. Підвищення температури, навпаки, сприяє інтенсифікації гідратації, причому мінерал C_2S за цих умов проявляє відносно вищу реакційну активність порівняно з C_3S [15, 16].

1.4 Процес твердіння бетону

З хімічної точки зору твердіння бетону є складним фізико-хімічним процесом, який супроводжується поступовим загущенням цементного тіста та формуванням суцільної просторової структурної системи. До її складу входять як гідратовані, так і ще не залучені до реакцій частинки цементу [21, 22]. Процес гідратації починається безпосередньо після контакту цементу з водою. Уже через декілька хвилин поровий розчин між зернами цементу стає перенасиченим іонами кальцію, сульфатів і гідроксид-іонів, що утворюються

внаслідок гідролізу трикальцієвого силікату (C_3S) [23]. Оскільки аліт є основною мінеральною фазою портландцементного клінкеру, саме його гідратація має визначальний вплив на перебіг і кінетику процесу твердіння цементного каменю [24].

Стадія твердіння

На цій стадії відбувається активне розчинення клінкерних мінералів у водному середовищі з утворенням нестійких перенасичених розчинів [22]. Першими продуктами гідратаційних реакцій є кальцієві гідросилікати, що формуються внаслідок взаємодії води з алітом і белітом [25]. Паралельно відбувається виділення гідроксиду кальцію, який накопичується у поровому просторі цементного тіста та впливає на подальший розвиток мікроструктури цементного каменю [26].

Стадія колоїдного формування (тужавлення)

Цей період характеризується появою в системі тонкодисперсних гідратних новоутворень, які мають гелеподібний характер [21, 27]. У процесі гідратації аліту та беліту відбувається інтенсивне утворення кальцієвих гідросилікатів і гідроксиду кальцію $Ca(OH)_2$, а поверхня цементних зерен поступово вкривається шаром продуктів реакції [23]. Така плівка частково ускладнює подальший доступ води до не гідратованих мінералів клінкеру, що призводить до тимчасового зниження швидкості гідратації [25].

У міру переходу гелеподібних новоутворень у більш термодинамічно стабільний стан змінюється характер міжчастинкових взаємодій. Внутрішня структура матеріалу ускладнюється за рахунок кристалізації більш упорядкованих фаз, які формують жорсткий просторовий каркас цементного каменю та пронизують масу гелеподібних кальцієвих гідросилікатів [26, 28].

Явище контракції (стягування)

На цій стадії відбувається ущільнення цементного каменю, зменшується кількість вільної та капілярної води, а цементне тісто поступово втрачає пластичність [24]. Контракція зумовлена тим, що сумарний об'єм продуктів гідратації є меншим за об'єм вихідних компонентів – цементу і

води [27]. Унаслідок цього в структурі цементного каменю виникають внутрішні напруження, які за несприятливих умов твердіння можуть призводити до утворення мікротріщин і зниження довговічності бетону [28, 29].

Цей етап також називають періодом тужавлення, або третім етапом твердіння [21, 22].

З подальшим наростанням механічної міцності, яке забезпечується ущільненням структури та збільшенням частки кристалічної фази, період твердіння супроводжується явищем кристалізації – перетворенням колоїдної гелевої фази на кристалічну [32, 33].

Процес твердіння та гідратації триває протягом тривалого часу, хоча інтенсивність реакцій поступово зменшується. Наприкінці настає період, коли гідратні оболонки навколо зерен цементу стають настільки щільними, що проникнення води до центру зерна практично припиняється. У результаті подальше наростання міцності цементного каменю сповільнюється, а частина зерен у ядрі залишається непрогідратованою, що становить приблизно 30–35 % від маси цементу [31, 34].

1.5 Методи контролю формування структури в'язучих речовин

Міцнісні характеристики в'язучих матеріалів формуються під впливом комплексу взаємопов'язаних чинників. Визначальне значення мають фазовий склад цементу та його мінералогічні особливості, співвідношення води і цементу в суміші, дисперсність помелу та розподіл частинок за розмірами, а також наявність і кількість тонкоподрібнених мінеральних компонентів [35, 36]. Вагомий вплив здійснюють види та дозування розчинних хімічних добавок, технологія ущільнення бетонної суміші і рівень її ефективності, а також режим твердіння, який визначається температурно-вологісними умовами, тиском і складом середовища [31, 37]. Крім того, на кінцеву міцність впливають тривалість протікання гідратаційних процесів, ступінь їх завершеності, склад і будова продуктів гідратації, а також мікроструктура й текстурні особливості цементного каменю [32, 34].

Інтенсивність розвитку міцності бетону значною мірою залежить від класу застосованого цементу, початкового водовмісту під час замішування та використання різних функціональних добавок [30, 31].

Рівень активності цементу, який відображається його маркою, визначається співвідношенням клінкерних мінералів і тонкістю помелу. Для отримання бетонів з прискореним набором міцності доцільно застосовувати цементи алітово-алюмінатного типу з часткою аліту близько 50–55 % [34, 36].

Збільшення ступеня подрібнення цементу приводить до активізації процесів гідратації та, відповідно, до швидшого набору міцності. Раціональним з технологічної й економічної точок зору є помел цементу з питомою поверхнею в межах **4500–5000 см²/г**. Подальше підвищення тонкості супроводжується значним зростанням енерговитрат, тоді як приріст міцнісних характеристик матеріалу є незначним і економічно недоцільним [32, 38].

Зменшення кількості води на стадії приготування бетонної суміші позитивно впливає на швидкість формування міцної структури цементного каменю. Водночас надмірне зниження водо-цементного відношення (менше 0,5) призводить до неповного перебігу гідратаційних реакцій, що негативно відбивається на щільності та однорідності сформованої структури [31, 35].

Вібраційне ущільнення та теплово-вологісна обробка бетонних сумішей повинні проводитися у строго визначені періоди, які відповідають особливостям розвитку пластичної міцності та характеру теплових процесів у системі [37, 39]. Колоїдна структура, що формується на завершенні початкової стадії формування цементного каменю, створює найбільш сприятливі умови для ефективного ущільнення матеріалу. Виконання вібрування наприкінці першого етапу структуроутворення дає змогу істотно підвищити міцність бетону та значно зменшити його проникність [36, 40].

Технологічні впливи на бетонну суміш доцільно узгоджувати зі змінами її електрофізичних властивостей. Зокрема, оптимальний момент для

проведення вібраційного ущільнення відповідає максимальним значенням електропровідності суміші. Аналіз змін електроповерхневого потенціалу дозволяє визначити раціональний час повторного вібрування, а також завершення теплово-вологісної обробки бетону [39, 41].

Перспективним напрямом керування процесами структуроутворення цементних систем є регулювання взаємодії між компонентами бетонної суміші. До таких підходів належать, зокрема, видалення розчиненого повітря з води замішування та обробка заповнювачів спеціальними розчинами для зміни електричного заряду їх поверхні [35, 40].

Значно ширші можливості формування структури твердіння з наперед заданими експлуатаційними властивостями забезпечує застосування хімічних методів у технології бетону. Використання різноманітних добавок дозволяє цілеспрямовано покращувати міцність, морозостійкість, водонепроникність і корозійну стійкість бетонів [31, 37, 42].

Окрім введення добавок, у практиці виробництва залізобетонних виробів застосовуються різні хіміко-технологічні прийоми, спрямовані на інтенсифікацію процесів твердіння та скорочення тривалості виробничих циклів. До них відносяться теплова обробка за різних режимів тиску, попередній підігрів бетонних сумішей, використання електричних і електромагнітних впливів, ультразвукова активація цементу та інші методи. Найбільш поширеними в сучасній технології збірного залізобетону залишаються теплова обробка та застосування хімічних добавок [37, 39].

1.6 характеристики добавок для важких бетонів

Хімічні добавки є невід'ємною складовою сучасних бетонних технологій і застосовуються на всіх етапах будівництва – від приготування розчинів до зведення відповідальних інженерних споруд, зокрема фундаментів, резервуарів, гідротехнічних і аеродромних конструкцій [31, 37, 42]. Їх використання дає змогу адаптувати властивості бетонних сумішей до конкретних технологічних і експлуатаційних вимог.

Завдяки широкому асортименту добавок можливо цілеспрямовано впливати на властивості бетону: підвищувати його стійкість до заморожування й відтавання, покращувати здатність суміші до транспортування насосами, регулювати швидкість набору міцності, обмежувати усадкові деформації, а також отримувати легкі бетонні матеріали шляхом керування процесами пороутворення. Крім того, добавки дозволяють оптимізувати технологічні параметри виготовлення бетонів [37, 43].

Найбільш поширеною групою модифікаторів є пластифікуючі добавки, які забезпечують підвищення рухливості бетонної суміші без необхідності збільшення кількості води. На відміну від простого розбавлення суміші водою, застосування пластифікаторів не призводить до зниження щільності та міцності бетону, не викликає надмірної усадки і не подовжує строки висихання конструкцій перед подальшими опоряджувальними роботами [32, 42].

Використання пластифікуючих добавок дає змогу зменшити водовміст у бетонній суміші до **30 %** при збереженні необхідної рухливості. Це сприяє формуванню більш щільної та водонепроникної структури бетону, зниженню витрати цементу та зменшенню деформацій у процесі твердіння [31, 37].

За функціональною дією хімічні добавки можна умовно поділити на кілька груп. До першої належать речовини, що впливають на технологічні властивості бетонної суміші, зокрема пластифікуючі, стабілізуючі та водоутримуючі компоненти. Друга група охоплює добавки, призначені для регулювання процесів тужавлення і твердіння, включаючи прискорювачі, сповільнювачі та склади, що забезпечують твердіння бетону за низьких температур. Окремо виділяють добавки, які змінюють порову структуру матеріалу – газо- та піноутворювальні, а також ущільнювальні компоненти. До самостійної категорії належать речовини, що зменшують деформації та підвищують захисні властивості бетону, зокрема сполуки, які уповільнюють корозію сталеві арматури [37, 44].

Крім того, існують добавки спеціального призначення, які надають бетону додаткових функціональних властивостей. Серед них – гідрофобізуючі речовини, що знижують водопоглинання, компоненти для підвищення хімічної стійкості в агресивних середовищах, а також добавки, що забезпечують електроізоляційні, бактерицидні або захисні властивості матеріалу [42, 45].

Згідно з вимогами національних нормативних документів, хімічні добавки поділяють на групи залежно від характеру їх впливу на бетонну суміш і затверділий бетон. До цієї класифікації входять добавки, що змінюють реологічні властивості суміші, зокрема пластифікуючі компоненти різного рівня дії – від високоефективних суперпластифікаторів до слабопластифікуючих речовин. Окрім них, виділяють стабілізатори, водоутримуючі добавки, речовини, які покращують транспортування та збереження бетонної суміші, регулятори процесів тужавлення, а також матеріали, що забезпечують контрольоване пороутворення [37].

Окрему групу становлять добавки, призначені для регулювання швидкості твердіння бетону. До них належать як речовини, що сповільнюють перебіг твердіння, так і добавки, які його інтенсифікують [43, 44].

Залежно від експлуатаційного ефекту також виділяють добавки, що сприяють підвищенню міцності бетону, його корозійної та морозостійкості, а також зменшенню водо- й газопроникності. До цієї категорії відносять водоредукуючі добавки різних класів ефективності, ущільнювальні (кольматуючі) компоненти, газо- та повітровтягувальні речовини, а також інгібітори корозії сталеві арматури [31, 42, 45].

До добавок спеціального призначення належать речовини, що забезпечують бетону додаткові функціональні властивості. Серед них – протиморозні добавки, які дозволяють виконувати бетонні роботи за знижених температур, а також гідрофобізуючі матеріали різного ступеня дії, що зменшують водопоглинання бетону [37, 44].

За механізмом впливу на цементні системи добавки можна поділити на кілька принципово різних груп. Перша охоплює речовини, які змінюють розчинність мінерального в'язучого без безпосередньої хімічної взаємодії з ним. До таких належать електроліти з іонами, аналогічними іонам в'язучої речовини, електроліти з іншими іонними складовими, а також неелектроліти [32, 34].

Другу групу утворюють добавки, що вступають у хімічну взаємодію з мінеральним в'язучим із формуванням малорозчинних або слабкорозчинних комплексних сполук. До них належать електроліти, здатні утворювати сполуки приєднання, зокрема подвійні солі та різні гідроксосполуки, а також речовини, що реагують за механізмом іонного заміщення [34, 45].

Окремо виділяють так звані «**центри кристалізації**» або **затравки**, які являють собою тонкодисперсні продукти гідратації чи споріднені за складом матеріали. До них належать напівводний гіпс, гідросилікати портландцементу, мікрокремнезем і метакаолін, що сприяють спрямованому формуванню структури цементного каменю [46–48].

Особливу групу складають **органічні поверхнево-активні речовини**. Залежно від характеру дії їх поділяють на **гідрофілізуючі (пластифікуючі)**, до яких належать лігносульфонати, сульфомеламін- та сульфонафтальнформальдегідні сполуки, полікарбоксилати й поліакрилати, а також на **гідрофобізуючі та повітровтягувальні** речовини, зокрема силіконати різного складу, солі смоляних кислот і полігідросилоксани [37, 45, 49].

Добавки для бетонів

Вид добавки за хімічним складом (структурна формула). Тип добавки за ефективністю (водоредуруючий ефект, %)	Марки добавок (фірма, країна-виробник)	Призначення					Клас за В.Б. Рагновим
		пластифікатори	гідрофобизуючі	повтроутягувальні	газоутворювальні		
Лігносульфонати (рис.1, а). Від слабо- до сильно-пластифікуючих (5÷15 %)	ЛСТ, ЛТМ, ЛСТМ-2 (Росія)	+					4.1
	Универсал-П (ВАТ «СКТ-Стандарт», Росія)	+					4.1
	Релаксол (ТОВ «Будіндустрія ЛТД», м. Запоріжжя)	+					4.1
	НЛК (АТЗТ «Курязький ДБК», м. Харків)	+					4.1
	SL (УкрДАЗТ, м. Харків)	+					4.1
	Stacheplast (Stachema, Словаччина)	+					4.1
Сульфомеламінформальдегіди (рис.1, б). Від слабо пластифікуючих до суперпластифікаторів (5÷25 %)	10-03 (м. Єнакієве)	+					4.1
	МФ-АР (м. Перм, Росія)	+					4.1
	Melment (SKW Trostberg, Німеччина)	+					4.1
	Sikament-FF (Sika, Швейцарія)	+					4.1
	Peramin FS (Brenntag N.V., Бельгія)	+					4.1
Сульфонафталінформальдегіди (рис.1, в). Від сильнопластифікуючих до суперпластифікаторів (15÷25 %)	С-3, СП-1 (ВАТ «Полипласт», Росія)	+					4.1
	Дофен (НВФ «Модиф», м. Донецьк)	+					4.1
	Sikament-N (Sika, Швейцарія)	+					4.1
	Marefluid IF (Marefi, Італія)	+					4.1
	Adi-Con SP100 (Jemite Products Inc., Канада)	+					4.1
Полікарбоксилати (рис.1, з). Суперпластифікатори (20÷30 %)	Melflux (SKW Trostberg, Німеччина)	+					4.1
	Sika ViscoCrete (Sika, Швейцарія)	+					4.1
	Stachement (Stachema, Словаччина)	+					4.1
	Хидетал-ГП-9 («СКТ-Стандарт»)	+					4.1
Поліакрилати (рис.1, д). «Гіперпластифікатори» (30÷45 %)	Dynamon SR (Marefi, Італія)	+					4.1
	Хидетал-ГП-8 (ВАТ «СКТ-Стандарт», Росія)	+					4.1
Епіксіловий натрію (рис.2, а)	ГКЖ-10	+	+	+			4.2
Метилсілікат натрію (рис.2, б)	ГКЖ-11	+	+	+			4.2
Метилсілікат калію (рис.2, в)	ГКЖ-11К (ДП «Кремнійполімер», м. Запоріжжя)	+	+	+			4.2
Алюмометилсілікат натрію	АМСП-2		+				4.2
Фенілетоксисилоксан	113-63 (ФЭС-50)		+				4.2
Полігіросилоксани	136-41 (ГКЖ-94)		+		+		4.2
	136-157М (ГКЖ-94М) (ДП «Кремнійполімер, м. Запоріжжя)		+		+		4.2
	Силол (НПП «Крок», м. Дніпропетровськ)		+				4.2
Абістат натрію (рис.2, з)	СНВ (Росія); СДО (м. Свалява)			+			4.2
Деревний пек	КТП; ОТП			+			4.2

Розповсюджені добавки-електроліти: прискорювачі твердіння, протиморозні, інгібітори корозії сталі, ущільнюючі

Назва	Хімічна формула	Позначення	Призначення				Клас за В.Б.Рагіновим
			прискорювачі твердіння	протиморозні	інгібітори корозії сталі	ущільнюючі	
Хлорид натрію	$NaCl$	ХН	+	+			1.2; 2.1
Хлорид кальцію	$CaCl_2$	ХК	+	+			1.1; 2.1
Хлорид заліза	$FeCl_3$	ХЖ				+	2.2
Нітрит натрію	$NaNO_2$	НН		+	+		1.2; 2.1
Нітрат натрію	$NaNO_3$	НН ₁	+				1.2; 2.1
Нітрат кальцію	$Ca(NO_3)_2$	НК	+	+			1.1; 2.1
Нітрит-нітрат кальцію	$Ca(NO_2)_2+Ca(NO_3)_2$	ННК	+	+			1.1; 2.1
Нітрит-нітрат-хлорид кальцію	$Ca(NO_2)_2+Ca(NO_3)_2+CaCl_2$	ННХК	+	+			1.1 ; 2.1
Поташ	K_2CO_3	П	+	+			2.2
Сульфат натрію	Na_2SO_4	СН	+				1.2; 2.1
Сульфат алюмінію	$Al_2(SO_4)_3$	СА				+	2.2
Сульфат заліза	$Fe_2(SO_4)_3$	СЖ				+	2.2
Тринарійфосфат	Na_3PO_4	ТНФ	+				2.2
Тетраборат натрію (бура)	$Na_2B_4O_7$	ТБН (Б)			+		2.2
Біхромат натрію	$Na_2Cr_2O_7$	БХН			+		2.2
Біхромат калію	$K_2Cr_2O_7$	БХК			+		2.2
Аміачна вода	NH_4OH	АВ		+			2.1
Карбамід	$CO(NH_2)_2$	М	+	+			2.1
Нітрат кальцію з карбамідом	$Ca(NO_3)_2+CO(NH_2)_2$	НКМ		+			1.1; 2.1

1.7 Добавки для прискорення твердіння бетону

Сучасні дослідження у галузі цементних матеріалів свідчать про значний вплив **неорганічних хімічних добавок** на процеси формування властивостей цементного каменю. Використання різних солей дає можливість цілеспрямовано змінювати технічні та експлуатаційні характеристики в'язучих матеріалів, особливо у складі комбінованих модифікуючих систем [50–52].

Дія однієї й тієї ж добавки не є універсальною та визначається як її концентрацією, так і мінералогічними особливостями цементу. Водорозчинні солі істотно впливають на формування порового простору, змінюючи розміри та розподіл пор, що безпосередньо відбивається на міцності, щільності й довговічності цементного каменю. Так, застосування нітриту натрію сприяє ущільненню структури продуктів гідратації силікатних фаз за рахунок зменшення частки великих пор [53, 54].

Хімічні добавки дозволяють керувати перебігом гідратаційних реакцій, вибірково прискорюючи взаємодію найбільш активних клінкерних мінералів і водночас стримуючи гідратацію фаз, що негативно впливають на експлуатаційні властивості матеріалу. За певних концентрацій нітрит натрію активізує гідратацію трикальцієвого силікату, а при підвищеному вмісті впливає також на алюмінатні складові цементу [55].

Інтенсивність гідратації цементних мінералів значною мірою залежить від хімічного складу рідкої фази. Використання різних середовищ замішування змінює розчинність компонентів цементу та швидкість перебігу реакцій, що відображається на структурі й властивостях затверділого каменю [46, 56].

Хлоридні сполуки, зокрема **хлорид кальцію**, відомі як ефективні прискорювачі тужавлення і раннього набору міцності. Вони інтенсифікують тепловиділення, сприяють формуванню гідросульфалюмінатних фаз та підвищують морозостійкість бетону [57]. Деякі хлориди металів утворюють у цементному камені малорозчинні гідроксидні або комплексні сполуки, що знижують його проникність. Водночас окремі солі, наприклад хлорид цинку, можуть уповільнювати початкове тужавлення, але забезпечують більш упорядковане структуроутворення та зростання пізньої міцності [58].

Ефективність хлоридів щодо формування механічної міцності змінюється залежно від їх хімічної природи та строків твердіння. Найбільш виражений вплив хлориду кальцію спостерігається на ранніх етапах

гідратації, тоді як на пізніших стадіях бездобавочні системи можуть демонструвати більш інтенсивний розвиток силікатних фаз [47].

Загалом використання неорганічних солей відкриває широкі можливості для регулювання швидкості гідратації та мікроструктури цементного каменю. Проте хлориди мають і суттєві недоліки, оскільки сприяють усадочним деформаціям і підвищують ризик корозії арматури. **Нітратні та нітритні сполуки** в цьому відношенні є більш безпечними: вони прискорюють твердіння, формують щільнішу структуру та не викликають корозійних процесів, хоча окремі з них можуть негативно впливати на міцність і потребують використання у складі комплексних добавок [49, 59].

Розчинні **сульфати** за певних умов підвищують розчинність клінкерних мінералів і сприяють формуванню стабільних гідросульфоалюмінатних фаз. **Карбонатні добавки**, у свою чергу, впливають на гідратацію алюмінатів, дещо сповільнюючи її, але забезпечуючи підвищення кінцевої міцності цементного каменю [60].

Нітрит натрію істотно скорочує індукційний період гідратації силікатних фаз, особливо за нормальних температур, і за характером дії на ранніх стадіях подібний до тепловологісної обробки. Він сприяє утворенню стійкого гідросилікатного гелю та оптимізації порової структури, хоча може негативно впливати на гідратацію двокальцієвого силікату [53, 61].

Механізм дії таких добавок пов'язаний зі зміною властивостей рідкої фази цементної системи, що визначає швидкість і напрямок гідратаційних процесів, а також морфологію новоутворених фаз [46].

У практиці бетонних технологій все частіше застосовуються **комплексні добавки**, які поєднують кілька активних компонентів і забезпечують одночасний вплив на рухливість суміші, строки тужавлення, інтенсивність набору міцності, тепловиділення, усадку та корозійну стійкість [45, 49]. Комбінування солей дозволяє підсилити позитивний ефект кожної з них і знизити негативні побічні прояви.

Поєднання хлориду кальцію з нітритом натрію, наприклад, зменшує корозійну активність хлоридів і водночас підвищує ранню міцність бетону. Інші багатокомпонентні системи дають змогу знизити витрати цементу та скоротити тривалість тепловологісної обробки виробів [59, 62].

Суттєвий вплив на процеси структуроутворення мають також кінетичні властивості води замішування. Регулювання її фізико-хімічних характеристик у поєднанні з електролітними високодисперсна мінеральна добавка (СРН)ми дозволяє змінювати умови масо- та енергопереносу в цементно-водній системі [56].

Комплексні електролітні добавки змінюють кінетику формування коагуляційної структури цементного гелю, прискорюючи завершення індукційного періоду та підвищуючи кінцеву міцність цементного каменю. Стискання дифузійного шару навколо частинок цементу активізує міжчастинкову взаємодію та сприяє формуванню більш щільної й стабільної структури затверділого матеріалу [46, 50].

1.8. Особливості структуроутворення цементних систем з високодисперсна мінеральна добавка (СРН)ми

Вплив хімічних добавок на цементні системи реалізується через декілька взаємопов'язаних механізмів, характер яких визначається хімічною природою модифікатора та умовами твердіння [63]. У разі використання неорганічних солей у цементно-водному середовищі можливе утворення малорозчинних кальцієвмісних сполук, що зумовлює додаткове розкладання клінкерних фаз і збільшення частки твердих продуктів гідратації. В інших випадках добавки підвищують розчинність кальцієвих компонентів, активізуючи гідратаційні процеси, або діють опосередковано через зміну властивостей рідкої фази цементної системи [64].

Ефективність дії добавок у портландцементних системах істотно змінюється залежно від мінералогічного складу цементу, стадії формування структури, а також типу і концентрації введеної речовини. На початковому етапі твердіння, коли визначальну роль відіграють процеси розчинення та

гідролізу, добавки здатні суттєво прискорювати розвиток гідратації. Надалі їх вплив послаблюється, а перевищення оптимального дозування може призводити до зниження ефективності дії, що пов'язано зі змінами структури водного розчину за високої іонної сили [65].

Осідання цементних частинок і формування первинної структури залежать від характеру міжчастинкової взаємодії. У коагуляційних системах осідання відбувається швидше, однак сформована структура є менш компактною. Застосування вібраційного впливу у період становлення коагуляційної структури сприяє ущільненню твердої фази та підвищенню міцності цементного каменю [66].

Експериментальні дослідження підтверджують, що введення хлориду кальцію у кількості кількох відсотків від маси цементу істотно скорочує тривалість тужавіння та інтенсифікує ранній набір міцності. Прискорювальний ефект посилюється зі зменшенням водоцементного відношення, тоді як його збільшення призводить до уповільнення процесів структуроутворення [67].

На ранніх стадіях твердіння дія хлоридів і нітратів кальцію або натрію проявляється переважно через підвищення іонної сили порового розчину, що сприяє скороченню індукційного періоду та більш ранньому формуванню коагуляційної структури цементного гелю [64].

Формування структури цементного гелю є складним кінетичним процесом, у якому поєднуються оборотні та необоротні стадії. Контрольоване тиксотропне руйнування міжчастинкових зв'язків у межах індукційного періоду забезпечує інтенсифікацію контактів між твердими частинками, ущільнення структури та зростання механічної міцності цементного каменю [66].

РОЗДІЛ 2. МЕТА РОБОТИ

Мета і задачі дослідження. Основна мета роботи – експериментально-підібрати раціональний склад хімічної добавки для прискорення термінів тужавіння бетону.

Об’єкт дослідження – терміни тужавіння цементного розчину з високодисперсна мінеральна добавка (СРН)ми.

Предмет дослідження – раціонально підібраний склад добавки, яка є прискорювача тужавіння цементу.

Поставленій меті відповідають такі **основні задачі дослідження**

Підібрати раціональний склад добавки з використанням: CaCl_2 , FeCl_3 , NaNO_2 , Na_2SO_4 , K_2CO_3 , Na_2CO_3 , гідратованого цементу.

Розробка способу приготування високодисперсних мінеральних речовин – центрів кристалізації з виконанням трьохфакторного експерименту.

Дослідити вплив тонкості помелу мінеральної затравки на кінетику процесів структуроутворення цементного тіста і швидкість набору міцності.

Дослідження динаміки зміни міцності зразків залежно від змінних факторів експерименту.

Провести аналіз впливу добавок на тепловиділення при твердінні цементу.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 План експерименту

Планування експериментальних досліджень є методологічною основою отримання достовірних результатів і полягає у виборі такої кількості дослідів та умов їх проведення, які забезпечують розв'язання поставленого завдання з наперед заданою точністю [68]. Раціонально складений план дозволяє підвищити інформативність експерименту та зменшити вплив випадкових чинників.

Формування плану експерименту починається з визначення мети дослідження та обґрунтованого вибору об'єкта, яким може бути окремий матеріал або система, властивості якої підлягають кількісному аналізу. Саме на цьому етапі задаються межі дослідження та визначається коло параметрів, що мають істотний вплив на досліджуваний процес [69].

Найбільш ефективними є активні експерименти, у межах яких дослідник цілеспрямовано змінює окремі параметри об'єкта та контролює умови проведення дослідів. Такі керовані параметри називають факторами і зазвичай позначають символом X . Показники, що характеризують відповідь системи на зміну факторів, розглядаються як вихідні величини та позначаються символом Y [68].

Для опису залежності між вхідними факторами та вихідними параметрами використовують математичні моделі. У практиці планування експериментів широке застосування мають регресійні моделі, зокрема лінійні залежності першого порядку, які дозволяють оцінити внесок кожного фактора у формування результату. Значення коефіцієнтів регресії встановлюють на основі обробки експериментальних даних [70].

Використання математично-статистичних методів особливо доцільне при дослідженні впливу хімічних добавок на фізико-механічні властивості цементу. Побудовані моделі дають змогу прогнозувати поведінку матеріалу,

коригувати його склад, оптимізувати технологічні параметри виробництва та впроваджувати елементи автоматизованого керування процесами [71].

Зміна факторів у ході експерименту може здійснюватися за різними схемами. При трирівневому варіюванні кожному фактору задають мінімальне, середнє та максимальне значення, а різницю між середнім і крайніми рівнями визначають як інтервал варіювання. У разі дворівневого підходу використовують лише граничні значення факторів, що дозволяє суттєво скоротити кількість дослідів без істотної втрати інформативності [68].

Існують різні типи планів першого порядку: Однофакторний (класичний) експеримент. Повний факторний експеримент (ПФЕ) – реалізуються всі можливі комбінації рівнів факторів; кількість дослідів визначається формулою:

$$N=K^n, N = K^n, N=K^n,$$

де N – кількість дослідів, K – кількість рівнів факторів, n – число факторів [69].

Дробний факторний експеримент – використовується для зменшення числа дослідів за умови збереження інформативності моделі [70].

Для спрощення записів рівні факторів у матриці експерименту кодують:

- верхній рівень – «+»
- середній рівень – «0»
- нижній рівень – «-»

У нашому дослідженні було проведено трьохфакторний експеримент, матриця якого наведена в таблиці 3.1.

Постійні хімічні добавки у всіх дослідях:

- хлорид кальцію (CaCl_2) – 0,5%
- нітрит натрію (NaNO_2) – 0,5%
- сульфат натрію (Na_2SO_4) – 0,5%

Ці добавки були введені у постійному обсязі, а змінюваними факторами в експерименті виступали інші параметри.

Таблиця 3.1

Матриця планування експерименту

№ досліду	Рівні змінних факторів		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1
4	-1	-1	+1
5	+1	+1	-1
6	-1	+1	-1
7	+1	-1	-1
8	-1	-1	-1
9	+1	0	0
10	-1	0	0
11	0	+1	0
12	0	-1	0
13	0	0	+1
14	0	0	-1
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0

Планування експерименту

Змінні фактори (незалежні параметри):

Фактор	Позначення	Рівні варіювання
Вміст ДОБАВКИ, %	X ₁	2; 4; 6
Тривалість подріблення ДОБАВКИ, год	X ₂	1; 3; 5
Ступінь нейтралізації ДОБАВКИ, %	X ₃	25; 50; 75

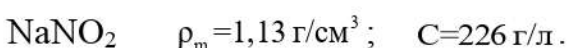
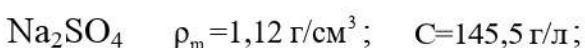
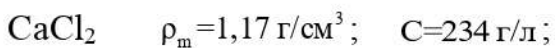
3.2 Методика приготування

Хімічні добавки вводились в цементне тісто у вигляді водного розчину. Для розрахунків необхідної кількості розчинів визначалась їх густина і вміст твердої речовини. Густина вимірювалася за допомогою ареометра.

Ареометр (грец. Αραλος – рідкий і μετρον – міра) – прилад (статичний густиномір) для вимірювання густини рідин за виштовхувальною силою, яка діє на тіло, що частково або повністю занурене в рідину, і яка зрівноважена вагою тіла. Ареометр оснований на законі Архімеда. Виготовляють цей прилад із скляної трубки, в нижню частину якої кладуть баласт (ртуть, свинцевий дріб) для надання стійкого вертикального положення. Такий ареометр занурюється тим глибше, чим менша густина рідини. На трубці нанесена шкала, проградуєвана при певній температурі в г/см³ або в градусах Боме (°Be) [72].

Вміст твердої речовини знаходився за табличними даними стосовно кожного виду добавки. Витрати матеріалів для проведення експерименту наведені в таблиці 3.2.

В процесі розрахунків користувались наступними даними:



3.3 Кількість добавки

Витрату води для приготування суміші розраховують з урахуванням кількості вологи, що міститься у водних розчинах хімічних добавок, а також ДОБАВКИ:

$$V_{\text{води}} = V_{\text{р-ну}} \cdot \rho_{\text{п}} - m_{\text{г}},$$

де $V_{\text{води}}$ – об'єм води, $\text{см}^3(\text{мл})$; $V_{\text{р-ну}}$ – об'єм розчину, $\text{см}^3(\text{мл})$; $\rho_{\text{п}}$ – густина добавки, $\text{г}/\text{см}^3$; $m_{\text{г}}$ – маса добавки, в перерахунку на суху речовину, г.

Для наважки ДОБАВКИ 15,75 г (4,5% від маси цементу) витрати кислоти повинні складати для часткової нейтралізації, відповідно: 30% – 10,5 мл; 60% – 21 мл; 90% – 31,5 мл.

5) Витрати суспензії ДОБАВКИ

Вміст ДОБАВКИ 1,5% від маси цементу складає 5,25 г.

Тривалість помелу ДОБАВКИ – 2 год, 4 год, 6 год:

1,5% – 16,25 г ДОБАВКИ	1,5% – 13,7 г	1,5% – 13,7 г
3% – 32,5 г ДОБАВКИ	3% – 27,4 г	3% – 27,4 г
4,5% – 48,75 г ДОБАВКИ	4,5% – 41,1 г	4,5% – 41,1 г.

Вміст води в суспензії ДОБАВКИ визначаємо за формулою:

$$V_{\text{в}} = \frac{m_{\text{срн}} \cdot W_{\text{срн}}}{100\%},$$

де $m_{\text{срн}}$ – вміст мінеральної добавки, г;

$W_{\text{срн}}$ – вологість мінеральної добавки, %.

Вологість ДОБАВКИ при помелі на протязі 2 год становить 67,7%; 4 год – 38,5%, 6 год – 38,3%. Вологість ДОБАВКИ встановлювалась дослідним шляхом.

Щоб знайти необхідну кількість добавочної води, для кожного дослідження окремо, потрібно від нормальної густоти (НГ) 25,4% (89 мл на 350 г цементу) відняти кількість води, що знаходиться у розчинах хімічних добавок і ДОБАВКИ.

Загальні витрати матеріалів для проведення експерименту наведено в таблиці 3.2.

3.4 Визначення оптимальної консистенції цементного тіста

Нормальну густоту цементного тіста визначали відповідно до вимог ДСТУ EN 196-3:2015 «Методи випробування цементу. Частина 3. Визначення строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму» [30]. Стандарт регламентує порядок проведення випробувань та критерії оцінювання консистенції цементної пасти.

Метод визначення нормальної густоти ґрунтується на експериментальному підборі такого водоцементного співвідношення, за якого стандартний товкачик приладу Віка занурюється в цементне тісто на глибину, встановлену нормативними вимогами. Регулювання консистенції здійснювали шляхом поетапної зміни кількості води замішування.

Відбір і підготовку цементу для досліджень проводили згідно з вимогами ДСТУ EN 196-7:2015 «Методи випробування цементу. Частина 7. Відбір і підготовка проб цементу» [31], що забезпечує репрезентативність зразків та відтворюваність результатів випробувань.

Результати визначення нормальної густоти виражали у вигляді масової частки води відносно маси цементу, у відсотках. Точність встановлення показника становила не гірше $\pm 0,25$ %, що відповідає вимогам стандарту [30].

Визначення термінів тужавлення цементу здійснювали за методикою, наведеною в ДСТУ EN 196-3:2015 [30], з використанням цементного тіста нормальної густоти.

Метод полягає у вимірюванні часу від моменту початку замішування до досягнення цементним тістом установлених стандартом стадій тужавлення, які фіксують за глибиною проникнення стандартної голки приладу Віка.

Обладнання та матеріали:

Прилад Віка зі сталеву голкою;

Кільце до приладу Віка;

Мішалка для замішування тіста;

Лабораторні ваги;

Вода.

Порядок визначення:

Початок тужавлення – час від початку замішування до моменту, коли голка при зануренні не доходить до пластинки на 2–4 мм.

Кінець тужавлення – час від початку замішування до моменту, коли голка занурюється не більше ніж на 1–2 мм.

Результати вимірювань у звіті наводять з округленням до 10 хвилин.

3.6 Дослідження міцнісних характеристик

Загальна характеристика методики

Оцінювання міцності цементного каменю на стиск здійснювали шляхом випробування зразків у формі кубів розміром 30×30×30 мм, виготовлених із цементного тіста нормальної густоти. Нормальну густоту цементного тіста визначали відповідно до вимог ДСТУ EN 196-3:2015 [30]; у дослідженні вона становила 25,4 %.

Ущільнення цементного тіста у формах виконували на струшувальному столику з прикладанням 30 ударів, що відповідає вимогам ДСТУ EN 196-1:2015 «Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності» [32]. Сформовані зразки залишали у формах та витримували за температури (20 ± 2) °С.

Випробування зразків на стиск проводили після 1, 2, 7 та 28 діб твердіння із використанням випробувального преса, що забезпечує необхідний клас точності навантаження відповідно до вимог стандарту [32].

Відбір матеріалів і підготовка до досліджень

Відбір і підготовку цементу для випробувань здійснювали відповідно до вимог ДСТУ EN 196-7:2015 «Методи випробування цементу. Частина 7. Відбір і підготовка проб цементу» [31]. До початку експериментів відібрані проби зберігали у сухому приміщенні в герметичній тарі.

Перед приготуванням цементного тіста цемент, вода та хімічні добавки мали температуру лабораторного приміщення. Для замішування використовували воду, що відповідає вимогам ДСТУ EN 1008:2019 «Вода для бетонів. Вимоги до відбору проб, випробування та оцінювання придатності» [33].

Зважування цементу та дозування води виконували з точністю не гірше ± 1 г або ± 1 мл, що забезпечує відтворюваність результатів.

Засоби вимірювання та обладнання

Для проведення випробувань використовували:

струшувальний столик для ущільнення цементного тіста відповідно до ДСТУ EN 196-1:2015 [32];

металеві форми для виготовлення кубикових зразків розміром $30 \times 30 \times 30$ мм;

випробувальний прес для визначення міцності на стиск, відкалібрований та атестований відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 7500-1:2018 «Матеріали металеві. Перевірка машин для статичних випробувань» [34];

лабораторні ваги з максимально допустимою похибкою $\pm 0,1$ г [35].

Формування та витримання зразків

Перед заповненням форм їхні внутрішні поверхні змащували тонким шаром нейтрального мастила для запобігання прилипання зразків. Для кожного встановленого строку твердіння виготовляли по три зразки.

Після завершення початкового періоду витримання зразки виймали з форм, наносили маркування та вимірювали їхні геометричні розміри з метою уточнення площі навантажуваної грані. Подальше твердіння здійснювали в умовах, регламентованих стандартом [32].

Обчислення та оформлення результатів

Метою експериментальних досліджень було створення умов для максимального збереження та реєстрації теплового ефекту, що виникає під час гідратації цементу. Відомо, що інтенсивність тепловиділення є інтегральною характеристикою швидкості гідратаційних процесів і широко використовується для оцінювання дії мінеральних та хімічних добавок на структурування цементного каменю [73, 74].

Для цього зразки цементного тіста розміщували всередині вимірювального приладу на ізолювальних дерев'яних підставках. З метою мінімізації тепловтрат внутрішній об'єм установки був ретельно теплоізолюваний: на дні використовували шар мінеральної вати, а стінки та кришку додатково захищали пінопластовими елементами. Такий підхід відповідає загальноприйнятим методикам лабораторного дослідження теплових ефектів гідратації цементу [75].

Підтримання заданої температури всередині установки здійснювали на рівні $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ з допустимим відхиленням $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, що узгоджується з вимогами стандартних випробувань цементних матеріалів [76]. Температурні зміни зразків фіксували протягом 15 годин шляхом безперервного контролю показників термометрів. Для підвищення достовірності вимірювань вимірювальні прилади встановлювали у металеві гільзи, заповнені невеликою кількістю термостійкого технічного масла, що забезпечувало стабільну теплопередачу від зразка до термометра [77].

Загалом було підготовлено 16 зразків цементного тіста, які розподіляли по чотири на кожен окремий дослід. Кожен зразок і відповідний йому термометр мали індивідуальне маркування, що дозволяло коректно зіставляти отримані температурні дані. Один з термометрів використовували для контролю температури повітря всередині приладу, що відповідало вимогам забезпечення стабільності експериментальних умов [78].

Дослідні роботи виконували з урахуванням змінних факторів, заданих матрицею планування експерименту (табл. 5.2), відповідно до положень математичного планування експериментів у технології будівельних матеріалів [79]. Підготовку цементних зразків, а також визначення кількості води та хімічних добавок проводили за методикою, аналогічною тій, що застосовувалася під час визначення міцності портландцементу (підрозділи 3.2 і 3.3), з дотриманням вимог ДСТУ EN 196-1 та ДСТУ EN 196-3 [76, 80].

РОЗДІЛ 4 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Портландцемент

Для проведення експериментальних досліджень використовували портландцемент марки ПЦ І-500-Н відповідно до ДСТУ Б В.2.7-46:2010 «Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови» [27].

Випробування цементу проводили відповідно до вимог ДСТУ EN 196-1:2015 «Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності» [28], ДСТУ EN 196-3:2015 «Методи випробування цементу. Частина 3. Визначення строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму» [21] та ДСТУ EN 196-6:2015 «Методи випробування цементу. Частина 6. Визначення тонкості помелу» [23].

Отримані результати порівнювали з нормативними показниками, встановленими в ДСТУ EN 197-1:2015 «Цемент. Частина 1. Склад, технічні вимоги та критерії відповідності до загальнозживаних цементів» [29], та наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Результати випробувань портландцементу

Найменування показників	Вимоги нормативного документу	Результати випробувань
Тонкість помелу, %	Проходження через сито №008 не менше 88%	90
Границя міцності при стиску у віці 28 діб, МПа	50-60	58
Тужавлення цементу:		
Початок	Не раніше 60 хв	2 год
Кінець	Не пізніше 10 год	8 год
Питома поверхня, см ² /т	Не нормується	2500

4.2 Вода

Для виконання лабораторних досліджень воду підбирали з урахуванням вимог, установлених ДСТУ ISO 3696:2003 «Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевірки» (ISO 3696:1987, IDT) [26]. У процесі експериментальних досліджень як рідину замішування використовували водопровідну воду, якість якої відповідала зазначеному стандарту.

За необхідності допускається застосування води з природних або штучних водойм за умови, що вміст домішок у ній не перевищує допустимих значень і вона не містить забруднень у вигляді стічних вод, надлишкових солей або мастильних речовин. Обмеження щодо використання морської води зумовлені її високою мінералізацією та значною концентрацією сульфатних і хлоридних іонів, які негативно впливають на процеси гідратації цементу та довговічність цементного каменю.

Під час проведення дослідів допускається використання води з показником кислотності в межах рН 4,0–12,5, що відповідає технічним вимогам до води для приготування цементних сумішей [26]. Залучення стічних вод можливе лише за наявності відповідного погодження з органами санітарно-епідеміологічного контролю.

Домішки органічного походження негативно впливають на перебіг процесів твердіння цементу. Зокрема, наявність цукрів і фенольних сполук уповільнює гідратацію та призводить до зниження міцнісних показників цементного каменю, тому їх концентрація не повинна перевищувати 10 мг/л [26]. Забруднення води нафтопродуктами, мастильними матеріалами або жирами спричиняє утворення плівок на поверхні цементних зерен, що перешкоджає нормальній гідратації та погіршує формування структури цементного каменю. У зв'язку з цим наявність таких плівок у воді замішування є недопустимою.

4.3 Добавки

Хлорид кальцію

Для проведення експериментальних досліджень застосовували кальцій хлорид двоводний, чистий ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), який використовувався як хімічна високодисперсна мінеральна добавка (СРН) до цементного тіста [81].

Зовнішній вигляд: плавлений продукт білого кольору, добре розчинний у воді та спирті.

Область застосування: у хімічній промисловості та аналітичних лабораторіях як реактив; у холодильній техніці; у будівництві та виробництві будівельних матеріалів – як прискорювач процесів тужавлення і твердіння бетонів, зокрема при виготовленні силікатної цегли та тротуарної плитки [82].

Показники якості чистого хлориду кальцію наведені в таблиці 4.2 відповідно до вимог чинних технічних умов [81].

Таблиця 4.2

Показники якості хлориду кальцію

Найменування показників	Норма, мас.част., %
Кальцій хлористий ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	>98
Нерозчинні у воді речовини	<0,05
Сульфати (SO_4)	<0,05
Залізо (Fe)	<0,004
Калій і натрій (K, Na)	<0,2
Магній (Mg)	<0,05
Важкі метали (Pb)	<0,001

Нітрит натрію

Для досліджень застосовували нітрит натрію, чистий для аналізу (ч.д.а.) – NaNO_2 [83].

Зовнішній вигляд: білий або злегка жовтуватий кристалічний порошок, добре розчинний у воді, негігроскопічний.

Галузь застосування: у хімічному синтезі та будівництві – як протиморозна високодисперсна мінеральна добавка (СРН) при зведенні монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій, а також як інгібітор корозії арматури [84].

Показники якості нітриту натрію (ч.д.а.) наведені в таблиці 4.3 згідно з вимогами нормативної документації [83].

Таблиця 4.3

Показники якості натрія азотнокислого

Найменування показників	Норма, мас.час., %
Нітрит натрію (NaNO ₂)	>99
Нерозчинні у воді речовини	<0,005
Хлориди (Cl)	<0,01
Сульфати (SO ₄)	<0,01
Залізо (Fe)	<0,0004
Калій (K)	<0,001
Важкі метали (Pb)	<0,0005

Сульфат натрію

У роботі використовували сульфат натрію кристалізаційний (Na₂SO₄) [85].

Зовнішній вигляд: безбарвні кристали або порошок білого кольору, розчинний у воді, не злежується, малогігроскопічний.

Область застосування: у будівництві – як протиморозна високодисперсна мінеральна добавка (СРН) та прискорювач твердіння бетонних сумішей; у хімічній промисловості; у системах акумулювання теплової енергії [86].

Показники якості сульфату натрію наведені в таблиці 4.4 відповідно до чинних технічних умов [85].

Показники якості сірчанокислого натрію наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Показники якості сірчанокислового натрію

Найменування показників	Норма, мас.час., %
Сульфат натрію (Na_2SO_4)	>99,4
Нерозчинні у воді речовини	<0,4
Хлориди у перерахунку на NaCl	<0,2
Іони магнію (Mg^{2+})	<0,02
Залізо у перерахунку на Fe_2O_3	<0,01
Вода	<0,1

Соляна кислота

У роботі використовували сульфат натрію кристалізаційний (Na_2SO_4) [85].

Зовнішній вигляд: безбарвні кристали або порошок білого кольору, розчинний у воді, не злежується, малогіроскопічний.

Область застосування: у будівництві – як протиморозна високодисперсна мінеральна добавка (СРН) та прискорювач твердіння бетонних сумішей; у хімічній промисловості; у системах акумулювання теплової енергії [86].

Показники якості сульфату натрію наведені в таблиці 4.4 відповідно до чинних технічних умов [85].

Показники якості соляної кислоти наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Показники якості соляної кислоти

Найменування показників	Норма, мас.час., %
Хлористого водню (HCl)	>33
Заліза (Fe)	<0,002

Вільного хлору	<0,002
Арсену (As)	<0,0001
Ртуті (Hg)	<0,0004

Хлоридна (соляна) кислота

У ході експериментальних досліджень як реагент застосовували хлоридну (соляну) кислоту, характеристики якої відповідали вимогам чинного нормативного документа [87]. Хлоридна кислота є сильною неорганічною кислотою та являє собою водний розчин хлористого водню (HCl).

У концентрованому стані масова частка основної речовини становить 36–37 %, густина розчину – 1,17–1,19 г/см³ [87]. Технічні різновиди кислоти можуть мати слабке жовтувате забарвлення, зумовлене наявністю домішок, переважно сполук заліза, що не чинять істотного впливу на її фізико-хімічні властивості в умовах лабораторного застосування.

Хлоридна кислота широко використовується в хімічній та металургійній промисловості для одержання неорганічних солей, очищення та обробки металів, а також як допоміжний реагент у низці технологічних процесів [88].

Показники якості хлоридної кислоти, що застосовувалася в дослідженнях, наведені в таблиці 4.5 відповідно до вимог документа [87].

РОЗДІЛ 5 ПОЯСНЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Оптимізація складу комплексної хімічної добавки

Дослідження було організовано у три логічно послідовні стадії. На початковому етапі здійснювався вибір видів хімічних модифікаторів та визначення їх оптимальних концентрацій для прискорення процесів твердіння цементу [86, 87]. Наступним кроком стало розроблення підходу до отримання високодисперсних мінеральних компонентів, які виконують роль ініціаторів кристалізації та впливають на формування мікроструктури цементного каменю [86]. Завершальний етап передбачав відпрацювання технологічних параметрів виготовлення бетонних виробів і умов їхнього твердіння відповідно до сучасних уявлень про керування структуроутворенням цементних матеріалів [87, 88].

У цьому підрозділі представлені результати першого етапу досліджень. Як об'єкти дослідження застосовувалися загальновідомі хімічні добавки, що використовуються для регулювання процесів тужавлення та твердіння цементу: хлорид кальцію (CaCl_2), хлорид заліза (FeCl_3), нітрит натрію (NaNO_2), сульфат натрію (Na_2SO_4), карбонат калію (K_2CO_3), суперпластифікатор типу С-3, а також спеціально підготовлений гідратований цемент, умовно позначений як високодисперсна мінеральна добавка (СРН) [86, 88].

Експериментальні випробування охоплювали різні варіанти використання зазначених компонентів: у вигляді окремих речовин, їх двокомпонентних поєднань, а також більш складних багатоконпонентних систем, що включали три або чотири складові. Загальна кількість проведених лабораторних дослідів становила 120. Отримані експериментальні дані систематизували та обробляли з використанням табличного процесора Excel,

що дозволило виконати попередній статистичний аналіз та виявити найбільш ефективні склади [88].

5.1.1 Закономірності впливу хімічних добавок на тужавлення і міцність цементу

З урахуванням встановлених обмежень щодо обсягу дипломної роботи в таблиці 5.1 наведено лише строки тужавлення та значення міцності цементів для складів з найбільш ефективними поєднаннями добавок. Зазначені композиції були відібрані за результатами попереднього аналізу експериментальних даних із застосуванням комп'ютерних засобів обробки інформації та з урахуванням загальних закономірностей гідратації портландцементу [86, 87].

Хлорид кальцію (CaCl_2), за узагальненими літературними даними, підвищує розчинність клінкерних мінералів у лужному середовищі, що забезпечує зростання міцності цементного каменю на всіх етапах тверднення. Крім того, він проявляє виражену прискорювальну дію щодо процесу тужавлення портландцементу [89, 90].

Хлорид заліза (FeCl_3) сприяє досягненню підвищених показників міцності на сьому добу тверднення, проте на ранніх стадіях не проявляє ефекту прискорення. Його використання потребує збільшення кількості води замішування на 9–11 % порівняно з бездобавочними системами. Через встановлену несумісність із нітритом натрію дана високодисперсна мінеральна добавка (СРН) була виключена з подальших досліджень [91].

Серед індивідуальних добавок, які вводилися у кількості 1,5 % від маси цементу, можна виділити такі характерні особливості.

Нітрит натрію (NaNO_2) виявляє помірний прискорювальний ефект у перші дві доби тверднення, однак істотного скорочення строків тужавлення не забезпечує. На подальших етапах у деяких випадках спостерігається зниження інтенсивності гідратаційних процесів, що узгоджується з даними сучасних досліджень [90, 92].

Таблиця 5.1

Вплив хімічних добавок на терміни тужавлення і міцність затверділого цементу

№ п/п	Вид і комбінація хімічних добавок	Терміни тужавлення, год./хв.		Міцність при стиску, МПа		
		Початок	Кінець	1 доба	2 доби	7 діб
1	2	3	4	5	6	7
1	Цемент без добавок	3 ¹⁵	4 ³⁰	33,7	57,8	76,6
2	CaCl ₂	1 ³⁰	2 ¹⁵	45,7	69,1	86,6
3	FeCl ₃	1 ²⁵	2 ⁴⁰	30,5	50,6	100,6
4	NaNO ₂	2 ³⁰	4 ²⁰	42,4	66,4	62,9
5	K ₂ CO ₃	0 ⁵⁰	1 ²⁵	19,7	41,3	60,9
6	Na ₂ SO ₄	1 ³⁰	1 ⁵⁵	33,7	56,3	74,5
7	C-3	5 ³⁰	8 ¹⁵	34,1	59,6	72,1
8	CPH	2 ⁰⁰	2 ⁵⁰	43,7	68,1	83,0
9	CPH + C-3	4 ³⁵	4 ⁴⁰	43,5	53,4	88,7
10	CaCl ₂ + NaNO ₂	2 ⁰⁰	2 ⁴⁵	51,7	69,0	82,4
11	CaCl ₂ + K ₂ CO ₃	2 ⁰⁵	4 ³⁵	42,5	72,9	99,3
12	CaCl ₂ + Na ₂ SO ₄	2 ¹⁰	4 ²⁵	42,2	58,4	78,4
13	CaCl ₂ + C-3	3 ⁰⁵	5 ⁵⁰	44,1	61,2	97,1
14	CaCl ₂ + CPH	1 ²⁰	2 ⁰⁰	44,6	71,7	119,9
15	NaNO ₂ + K ₂ CO ₃	0 ¹⁵	0 ²⁵	19,1	38,5	46,1
16	NaNO ₂ + Na ₂ SO ₄	3 ²⁵	4 ²⁵	44,5	74,9	100,9
17	NaNO ₂ + C-3	4 ⁰⁰	5 ⁰⁰	28,9	59,1	63,3
18	NaNO ₂ + CPH	2 ³⁵	3 ⁴⁵	36,6	73,4	95,2
19	K ₂ CO ₃ + Na ₂ SO ₄	0 ⁰⁵	0 ¹⁰	25,4	31,1	56,3
20	K ₂ CO ₃ + C-3	1 ³⁰	2 ⁰⁰	29,0	39,0	69,7
21	K ₂ CO ₃ + CPH	0 ⁰⁵	0 ¹⁵	26,5	39,6	62,3
22	Na ₂ SO ₄ + C-3	4 ³⁰	7 ²⁵	37,2	44,3	57,1
23	Na ₂ SO ₄ + CPH	3 ⁰⁰	4 ⁰⁵	36,2	42,1	91,0
24	CaCl ₂ + CPH + C-3	3 ⁰⁰	3 ³⁰	40,0	53,9	80,2
25	CaCl ₂ + NaNO ₂ + C-3	2 ⁵⁰	3 ²⁰	46,5	67,8	69,2
26	CaCl ₂ + K ₂ CO ₃ + C-3	0 ²⁰	0 ³⁰	46,9	70,6	78,3
27	CaCl ₂ + Na ₂ SO ₄ + C-3	0 ⁴⁰	4 ³⁵	37,4	59,6	66,8
28	CaCl ₂ + Na ₂ SO ₄ + CPH	1 ⁴⁰	2 ¹⁵	43,0	65,4	77,7
29	CaCl ₂ + K ₂ CO ₃ + CPH	0 ¹⁰	0 ³⁰	47,5	76,5	70,9
30	CaCl ₂ + Na ₂ SO ₄ + CPH	2 ²⁰	4 ¹⁵	51,5	67,8	82,4
31	NaNO ₂ + K ₂ CO ₃ + C-3	1 ²⁵	1 ³⁵	31,5	59,5	89,4
32	NaNO ₂ + Na ₂ SO ₄ + C-3	0 ⁴⁰	4 ⁵⁵	26,5	64,3	75,9
33	NaNO ₂ + K ₂ CO ₃ + CPH	0 ⁰⁵	0 ¹⁵	34,9	49,3	51,4
34	NaNO ₂ + Na ₂ SO ₄ + CPH	4 ¹⁵	5 ¹⁵	39,0	39,8	79,5

35	$\text{NaNO}_2 + \text{C-3} + \text{CPH}$	3^{20}	4^{35}	26,0	42,9	68,1
36	$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{C-3} + \text{CPH}$	1^{10}	1^{20}	23,3	48,5	74,3

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7
37	$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{C-3}$	0^{40}	0^{50}	44,0	50,3	83,6
38	$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CPH}$	0^{10}	0^{15}	30,7	42,2	64,9
39	$\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{C-3} + \text{CPH}$	5^{55}	6^{10}	39,8	64,2	75,0
40	$\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{C-3} + \text{CPH}$	1^{55}	2^{45}	51,8	61,3	96,3
41	$\text{CaCl}_2 + \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{C-3} + \text{CPH}$	0^{20}	0^{40}	38,2	56,6	70,0
42	$\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{C-3} + \text{CPH}$	2^{35}	4^{20}	43,7	62,7	79,0
43	$\text{NaNO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{C-3} + \text{CPH}$	2^{20}	4^{40}	38,1	49,9	82,9
44	$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{C-3} + \text{CPH}$	0^{35}	0^{40}	41,3	51,2	67,2
45	$\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$	2^{40}	3^{50}	38,5	62,3	65,7
46	$\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CPH}$	2^{30}	3^{15}	43,9	64,0	75,1
47	$\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{CPH}$	0^{15}	1^{15}	50,0	66,6	68,4
48	$\text{CaCl}_2 (0,5) + \text{Na}_2\text{SO}_4 (0,5) + \text{NaNO}_2 (0,5) + \text{CPH}$	2^{20}	3^{35}	54,4	68,0	79,3

Карбонат калію (K_2CO_3) зумовлює інтенсивне формування первинної структури цементного тіста на початковій стадії, що різко скорочує строки тужавлення. Водночас прискорення процесів тверднення та підвищення міцності цементного каменю не відмічається [89].

Сульфат натрію (Na_2SO_4), за літературними джерелами, забезпечує значне підвищення міцності цементу після тепловологісної обробки, оскільки сульфат-іони підвищують розчинність клінкерних мінералів у кремнеземистому середовищі та сприяють інтенсифікації гідратації. Проте за нормальних умов тверднення виражений прискорювальний ефект не спостерігається [90, 93].

Суперпластифікатор типу С-3 широко застосовується у виробництві бетонів і розчинів як ефективний водоредукуючий агент. Його основна дія полягає у зменшенні в'язкості та підвищенні рухливості бетонної суміші, що дозволяє знизити витрату цементу. Разом із тим введення С-3, як правило, супроводжується подовженням строків тужавлення, а приріст міцності порівняно з бездобавочними системами не є суттєвим [91, 94].

Мінеральна високодисперсна мінеральна добавка (СРН) – центр кристалізації, застосована без інших хімічних домішок, забезпечує приріст міцності цементного каменю: у першу добу – у 1,3 раза, на другу добу – у 1,2 раза, а через сім діб – у 1,09 раза. За ефективністю дії на ранніх стадіях її вплив є співставним з дією CaCl_2 у тій самій кількості. Високодисперсна мінеральна добавка (СРН), являє собою попередньо гідратований портландцемент, у якому гідросилікати перебувають у гелеподібному, але більш упорядкованому стані, ніж у звичайному цементному камені. Такі частинки виконують роль центрів кристалізації та сприяють формуванню просторової структури цементного гелю в «стиснених умовах» [92, 93].

Комплексні добавки для бетону характеризуються багатофункціональною дією, оскільки одночасно впливають на кілька властивостей матеріалу. Їх застосування дозволяє підсилити позитивний ефект окремих компонентів (зокрема приріст міцності) та нейтралізувати небажані побічні явища, такі як корозія арматури або усадкові деформації [89, 94].

У проведених дослідженнях концентрація кожної хімічної речовини у складі комплексних добавок становила 1 % від маси цементу. Найбільш ефективними виявилися двокомпонентні системи $\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2$, $\text{CaCl}_2 + \text{СРН}$, $\text{NaNO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, які забезпечували підвищення міцності цементного каменю на всіх етапах випробувань. Поєднання $\text{NaNO}_2 + \text{СРН}$ та $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{СРН}$ не давало помітного ефекту в першу добу, проте сприяло зростанню міцності на сьому добу, що пояснюється дією центрів кристалізації [92].

Карбонат калію у будь-яких комбінаціях, у тому числі разом із суперпластифікатором С-3, різко скорочував строки тужавлення (до 15–25 хв), що робить його непридатним для практичного використання.

Серед потрібних комплексних добавок найбільш перспективними виявилися системи $\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{С-3}$, $\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{ДОБАВКИ}$, $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{ДОБАВКА}$, а також чотирьохкомпонентна композиція $\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{С-3} + \text{ДОБАВКА}$. Вони забезпечували збільшення міцності

цементного каменю вже в першу добу до 1,5 раза з подальшим інтенсивним твердненням [89, 93].

Отримані результати підтвердили, що найвищі показники міцності досягаються у випадках, коли до складу комплексних добавок входить хлорид кальцію, відомий як ефективний прискорювач тверднення цементу. Водночас його застосування супроводжується підвищеним ризиком корозії арматури внаслідок дії хлорид-іонів, особливо при концентрації понад 1 % [90].

За сучасними даними, негативний корозійний вплив CaCl_2 значною мірою компенсується введенням нітриту натрію, який виконує функцію інгібітора корозії сталеві арматури та одночасно скорочує індукційний період гідратації трикальцієвого силікату [92]. Проведені дослідження підтвердили ефективність такого підходу при поєднанні NaNO_2 з мінеральною добавкою – центром кристалізації.

З метою збереження позитивного впливу CaCl_2 на швидкість гідратації цементу та мінімізації його корозійної дії було запропоновано дослідити комплексну добавку такого складу: CaCl_2 – 0,5 %; NaNO_2 – 0,5 %; Na_2SO_4 – 0,5 %; ДОБАВКИ – 1,5 % від маси цементу. У цій системі кожен компонент підсилює дію іншого, забезпечуючи стабільне зростання міцності цементного каменю на всіх етапах тверднення. Уже в першу добу приріст міцності становив 61 % порівняно з бездобавочним цементом.

Таким чином, для прискорення гідратації портландцементу на початкових стадіях і одночасного зниження негативного впливу хлоридів на арматуру доцільно застосовувати комплексну хімічну добавку, що містить CaCl_2 , NaNO_2 і Na_2SO_4 у кількості по 0,5 % від маси цементу у поєднанні зі спеціально підготовленим центром кристалізації.

5.2 Створення методики приготування мінеральної добавки

Попередні дослідження показали, що ефективним способом прискорення процесів твердіння портландцементу є введення до системи

мінеральних компонентів, які виконують функцію зародків кристалізації та активізують формування структури цементного каменю [89–91].

У ролі такої мінеральної добавки (СРН) застосовували цемент, який заздалегідь пройшов стадію гідратації. Його отримували шляхом витримання цементного тіста з водоцементним відношенням 0,45 протягом трьох місяців, що відповідає підходам, описаним у роботах з хімії цементу [90, 91]. Після завершення цього періоду матеріал піддавали подрібненню в кульовому млині. З метою оцінки впливу ступеня дисперсності на швидкість структуроутворення та інтенсивність набору міцності помел здійснювали у двох режимах – у сухому стані та у водному середовищі, змінюючи тривалість обробки (2, 4 і 6 годин) [92].

Розподіл частинок за розмірами встановлювали шляхом ситового аналізу із використанням сит №016, №008 і №005 відповідно до загальноприйнятих методів оцінювання тонкості помелу цементних матеріалів [89, 93]. У результаті виділяли три групи фракцій: 0,16–0,08 мм, 0,08–0,05 мм і частинки розміром менше 0,05 мм. Ступінь тонкості помелу характеризували величиною залишку на контрольних ситах №008 та №005, яка для різної тривалості подрібнення становила:

13,9 % і 29,2 % після 1 години;

4,9 % і 27,4 % після 3 годин;

0,0 % і 6,5 % після 5 годин відповідно.

Кількість мінеральної добавки, що вводилася до цементної системи, змінювали в межах 1,5–4,5 % від маси в'язучого, що узгоджується з рекомендаціями щодо дозування мінеральних активаторів тверднення [92].

Встановлено, що попередньо гідратований портландцемент містив значну частку гідроксиду кальцію – 31,2 %, визначену методом кислотно-основного титрування соляною кислотою, який широко застосовується для кількісної оцінки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у гідратованих цементних системах [90, 91]. Оскільки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ був присутній у системі ще до початку основних

гідратаційних процесів, його концентрація істотно впливала на швидкість та характер структуроутворення.

Таблиця 5.2

Трьохфакторний експеримент для виявлення ролі ДОБОВКИ у цементному тісті

№ досліджу	Рівні змінних факторів			Чисельні значення змінних факторів		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
1	+1	+1	+1	5	5	75
2	-1	+1	+1	2	5	75
3	+1	-1	+1	5	1	75
4	-1	-1	+1	2	1	75
5	+1	+1	-1	5	5	25
6	-1	+1	-1	2	5	25
7	+1	-1	-1	5	1	25
8	-1	-1	-1	2	1	25
9	+1	0	0	5	3	50
10	-1	0	0	2	3	50
11	0	+1	0	3	5	50
12	0	-1	0	3	1	50
13	0	0	+1	3	3	75
14	0	0	-1	3	3	25
15	0	0	0	3	3	50
16	0	0	0	3	3	50
17	0	0	0	3	3	50

Для регулювання цього показника до водної суспензії мінеральної добавки вводили розчин HCl у кількостях, необхідних для нейтралізації 25, 50 та 75 % гідроксиду кальцію. У результаті реакції нейтралізації в системі додатково утворювався хлорид кальцію, який, як відомо, є ефективним прискорювачем гідратації портландцементу [89, 94]. Концентрація CaCl₂ зростала зі збільшенням ступеня нейтралізації, що впливало на кінетику раннього твердіння.

Для комплексної оцінки впливу мінеральної затравки (ДОБАВКИ) було проведено трьохфакторний експеримент, схема якого наведена в таблиці 5.2, з варіюванням основних технологічних параметрів досліджуваної системи відповідно до принципів планування експерименту [92].

X1 – кількість ДОБАВКИ, %: 2; 4; 6;

X2 – тривалість помелу, год: 1; 3; 5;

X3 – ступінь нейтралізації, %: 25; 50; 75.

5.2.1 Вплив складу добавок на тривалість тужавлення портландцементу

Початок тужавлення ПЦ

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

$$Y_{\text{мщ}} = 161,996 - 17X_1 + 4X_2 + 1,5X_3 - 9,682X_1^2 - 39,682X_2^2 + 17,818X_3^2 - 0,625X_1X_2 - 6,875X_1X_3 - 4,375X_2X_3;$$
$$F_p < F_T (16,5 < 19,3)$$

На рисунках 5.1–5.3 наведено залежність моменту початку тужавлення ПЦ від вмісту високодисперсної мінеральної добавки (СРН), тривалості його помелу та ступеня нейтралізації, розглянутої на трьох рівнях: максимальному, нульовому та мінімальному.

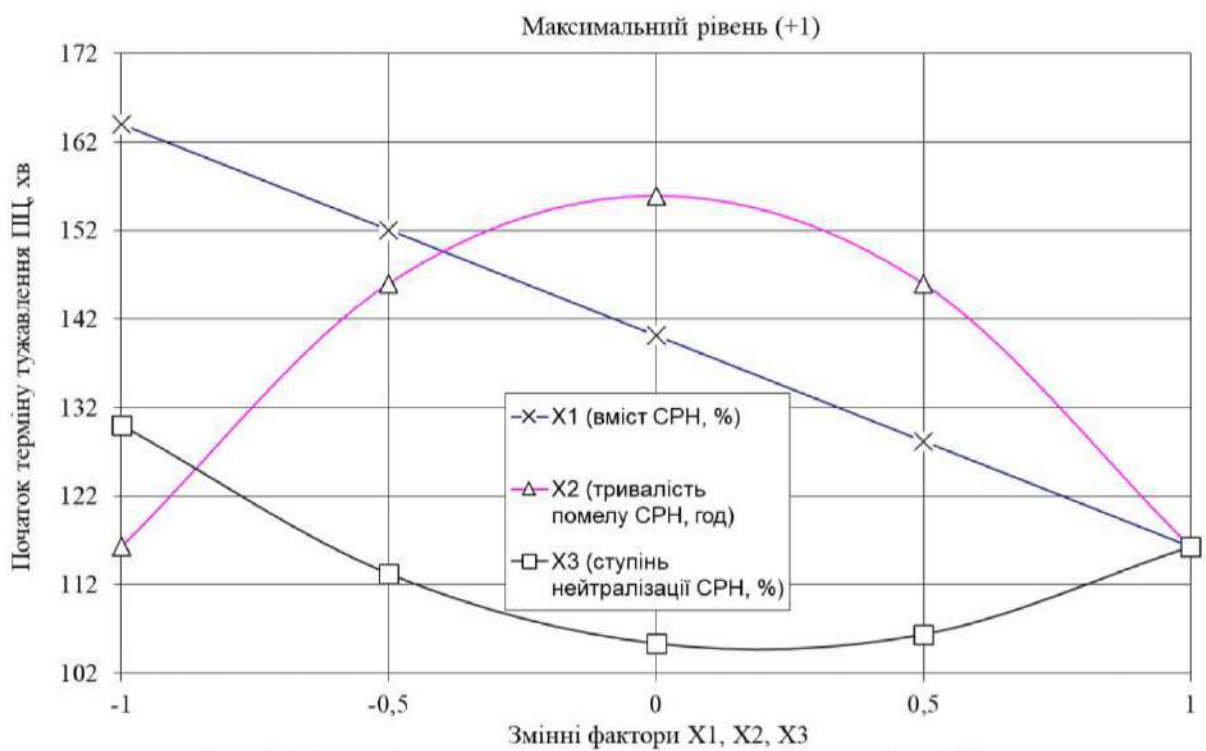


Рис. 5.1 Залежність початку термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

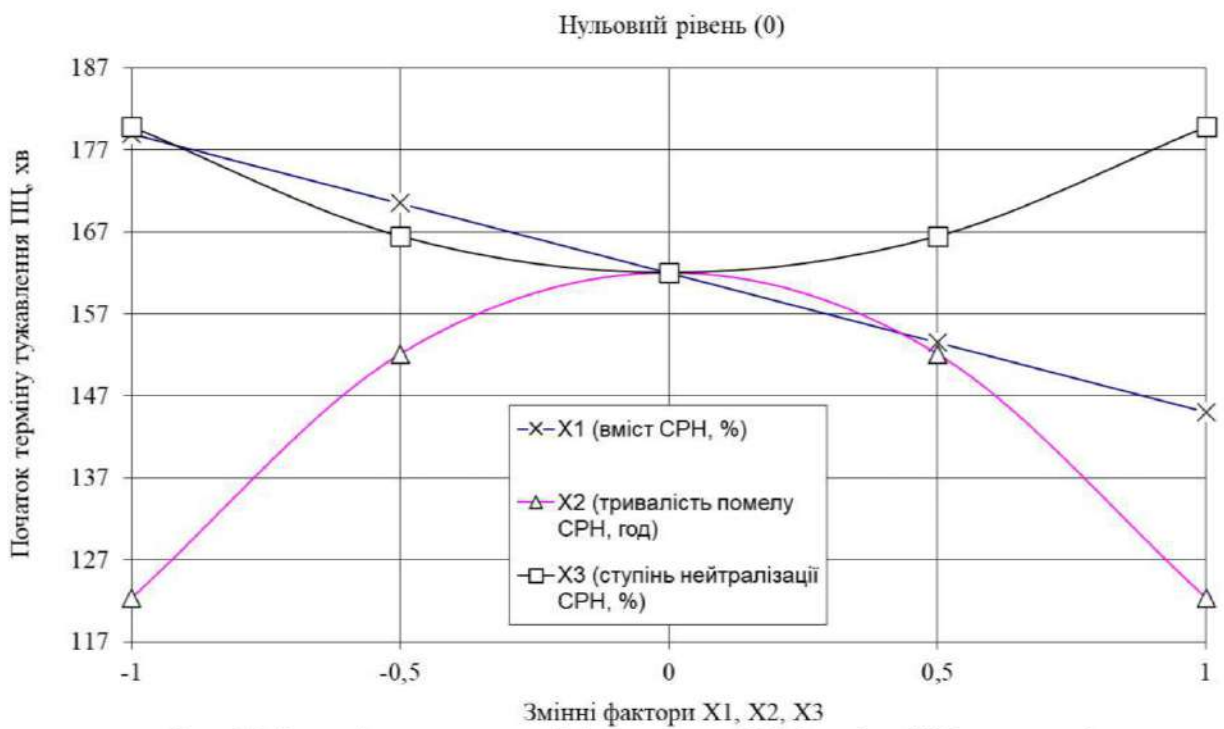


Рис. 5.2 Залежність початку термінів тужавлення ІЩ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

$$Y_{\text{min}} = 161,996 - 17X_1 + 4X_2 + 1,5X_3 - 9,682X_1^2 - 39,682X_2^2 + 17,818X_3^2 - 0,625X_1X_2 - 6,875X_1X_3 - 4,375X_2X_3;$$

$$F_p < F_T \quad (16,5 < 19,3)$$

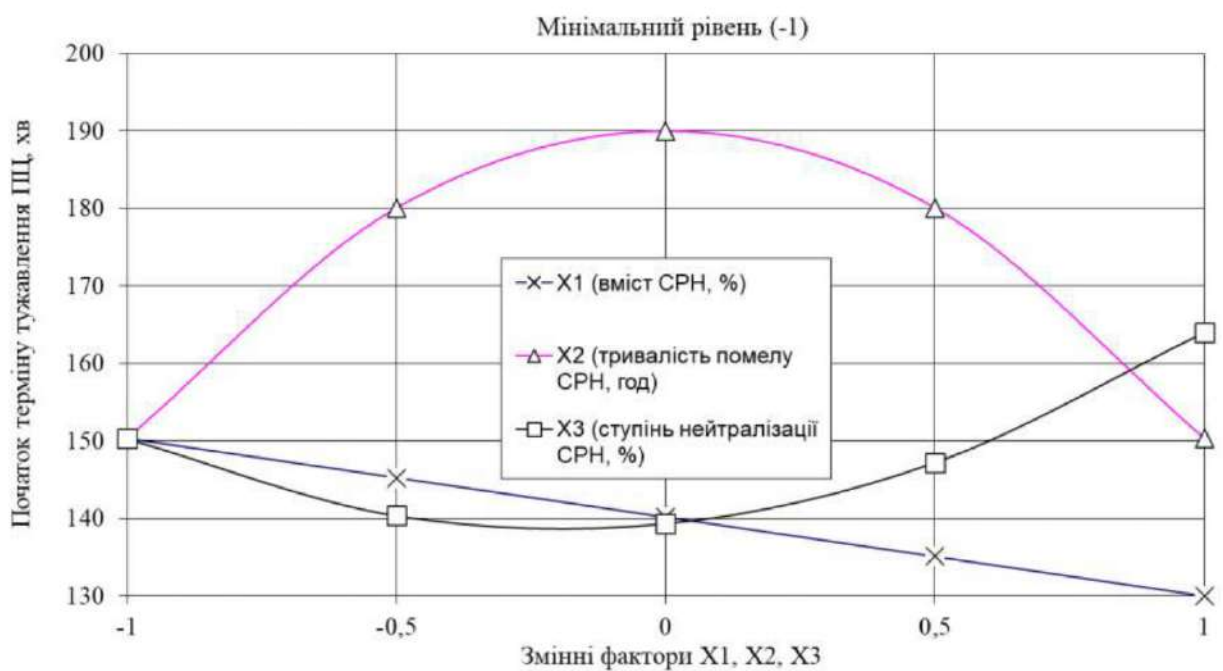


Рис. 5.3 Залежність початку термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

$$Y_{\text{min}} = 161,996 - 17X_1 + 4X_2 + 1,5X_3 - 9,682X_1^2 - 39,682X_2^2 + 17,818X_3^2 - 0,625X_1X_2 - 6,875X_1X_3 - 4,375X_2X_3;$$

$$F_p < F_T \quad (16,5 < 19,3)$$

Аналіз отриманих графіків свідчить, що на початок тужавлення портландцементу найбільш суттєво впливають вміст високодисперсної мінеральної добавки (СРН) та тривалість його помелу, тоді як ступінь нейтралізації гідратованого цементу має менший ефект.

Кінець тужавлення ПЦ

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

$$Y_{\text{міц}} = 208,655 - 22X_1 + 9X_2 + X_3 + 6,188X_1^2 - 48,812X_2^2 + 21,188X_3^2 - 6,25X_1X_3;$$
$$F_p < F_T (19,1 < 19,3)$$

На рисунках 5.4–5.6 представлено залежність кінця термінів тужавлення від тих самих змінних факторів. Аналіз цих графіків показує, що на кінець тужавлення портландцементу найбільший вплив мають вміст ДОБАВКИ та тривалість його помелу, тоді як ступінь нейтралізації гідратованого цементу впливає в меншій мірі.

5.2.2 Вплив складу добавок на тривалість тужавлення портландцементу (1доба)

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

$$Y_{\text{міц}} = 208,655 - 22X_1 + 9X_2 + X_3 + 6,188X_1^2 - 48,812X_2^2 + 21,188X_3^2 - 6,25X_1X_3;$$
$$F_p < F_T (19,1 < 19,3)$$

Рисунки 5.7–5.9 ілюструють залежність міцності портландцементу у віці 1 доби від тривалості помелу, вмісту та ступеня нейтралізації ДОБАВКИ на трьох рівнях факторів. Аналіз графіків свідчить, що найбільший вплив на міцність цементу має вміст високодисперсної мінеральної добавки (СРН), тоді як тривалість помелу гідратованого цементу впливає в меншій мірі. Максимальна міцність ПЦ була досягнута при вмісті високодисперсної мінеральної добавки (СРН) 2,25%, тривалості помелу 2 години та ступені нейтралізації 30%.

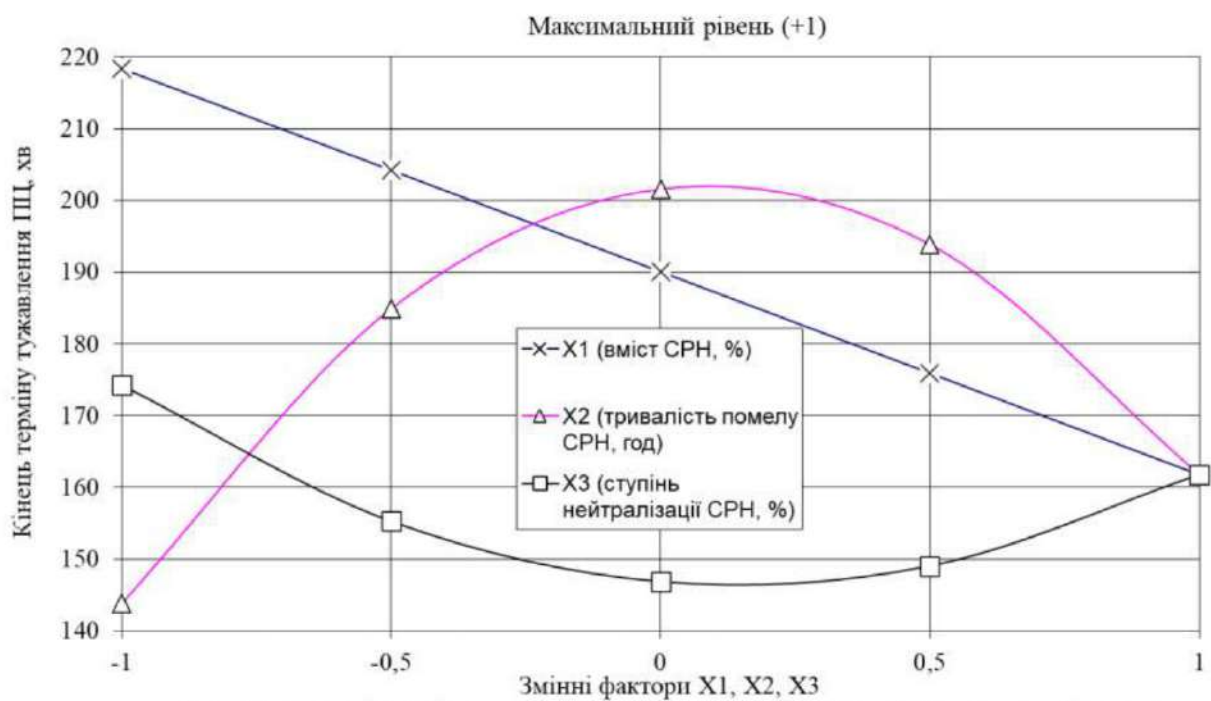


Рис. 5.4 Залежність кінця термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

$$Y_{\text{min}} = 208,655 - 22X_1 + 9X_2 + X_3 + 6,188X_1^2 - 48,812X_2^2 + 21,188X_3^2 - 6,25X_1X_3;$$

$$F_p < F_T \quad (19,1 < 19,3)$$

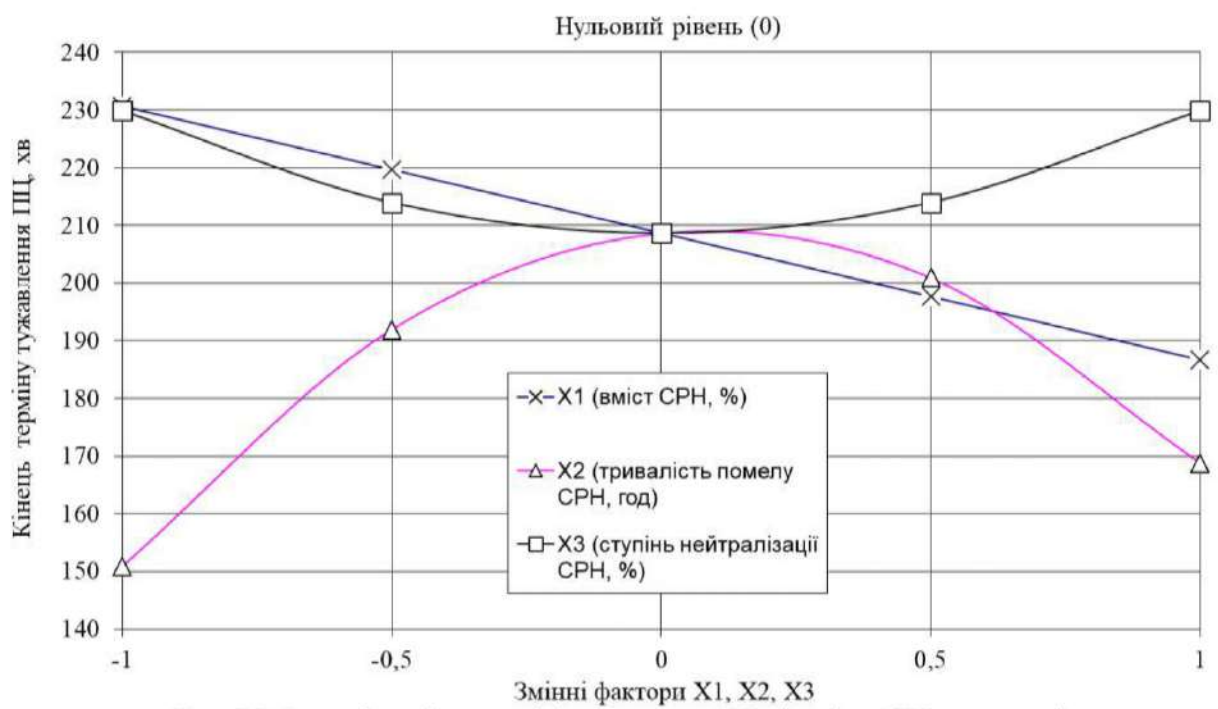


Рис. 5.5 Залежність кінця термінів тужавлення ІЩ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

$$Y_{\min} = 208,655 - 22X_1 + 9X_2 + X_3 + 6,188X_1^2 - 48,812X_2^2 + 21,188X_3^2 - 6,25X_1X_3;$$

$$F_p < F_T \quad (19,1 < 19,3)$$

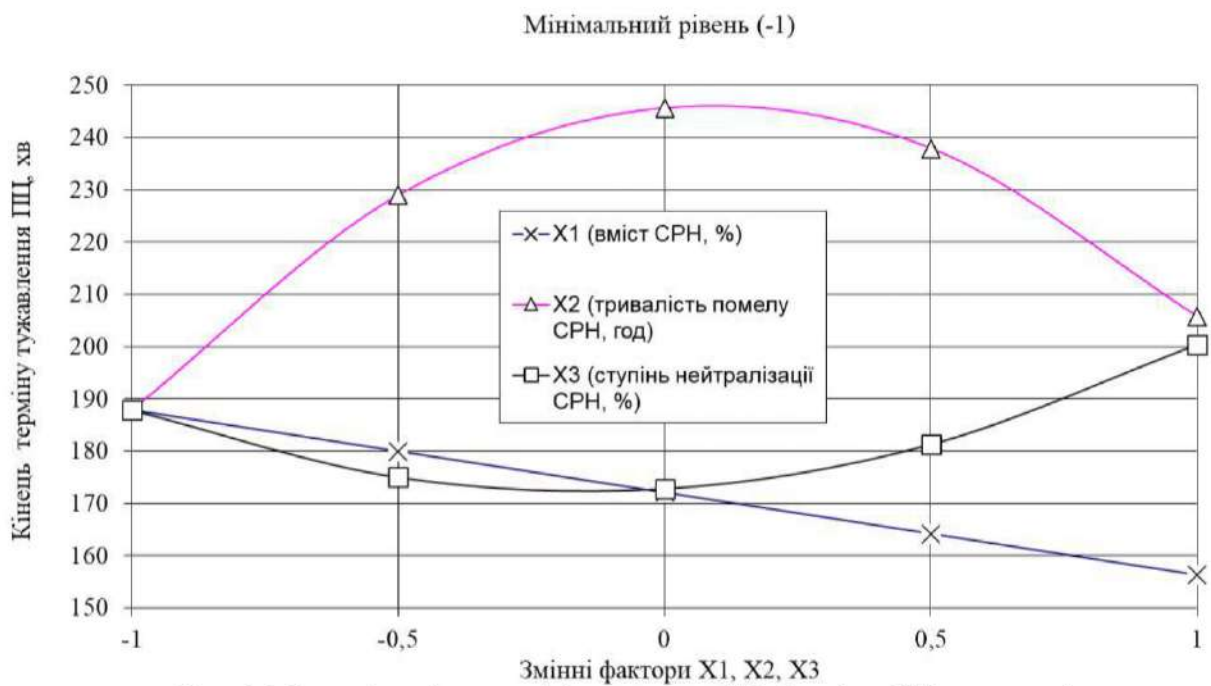


Рис. 5.6 Залежність кінця термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

$$Y_{\min.} = 208,655 - 22X_1 + 9X_2 + X_3 + 6,188X_1^2 - 48,812X_2^2 + 21,188X_3^2 - 6,25X_1X_3;$$

$$F_p < F_T (19,1 < 19,3)$$

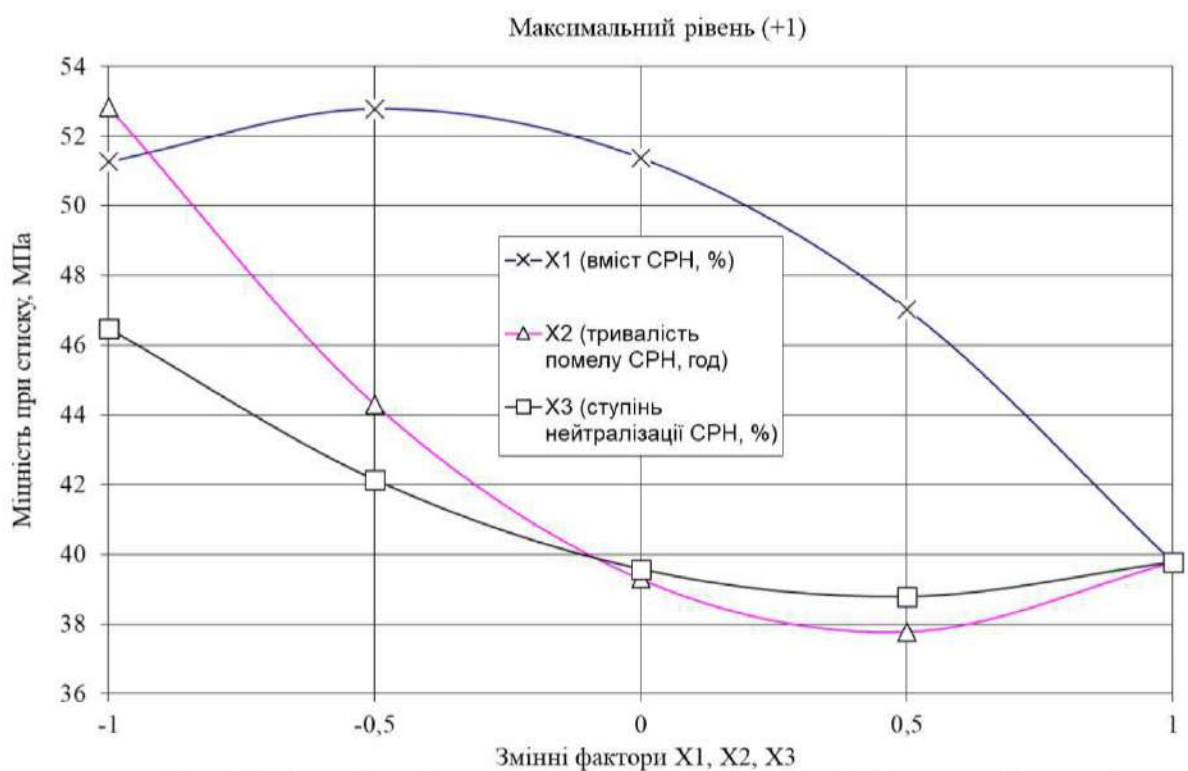


Рис. 5.7 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 1 добовому віці

$$Y_{\text{min}} = 43,968 - 0,67X_1 - 1,52X_2 + 0,55X_3 - 5,848X_1^2 + 7,002X_2^2 + 3,552X_3^2 - 3,363X_1X_2 - 1,713X_1X_3 - 1,638X_2X_3;$$

$$F_p < F_T (18,9 < 19,3)$$

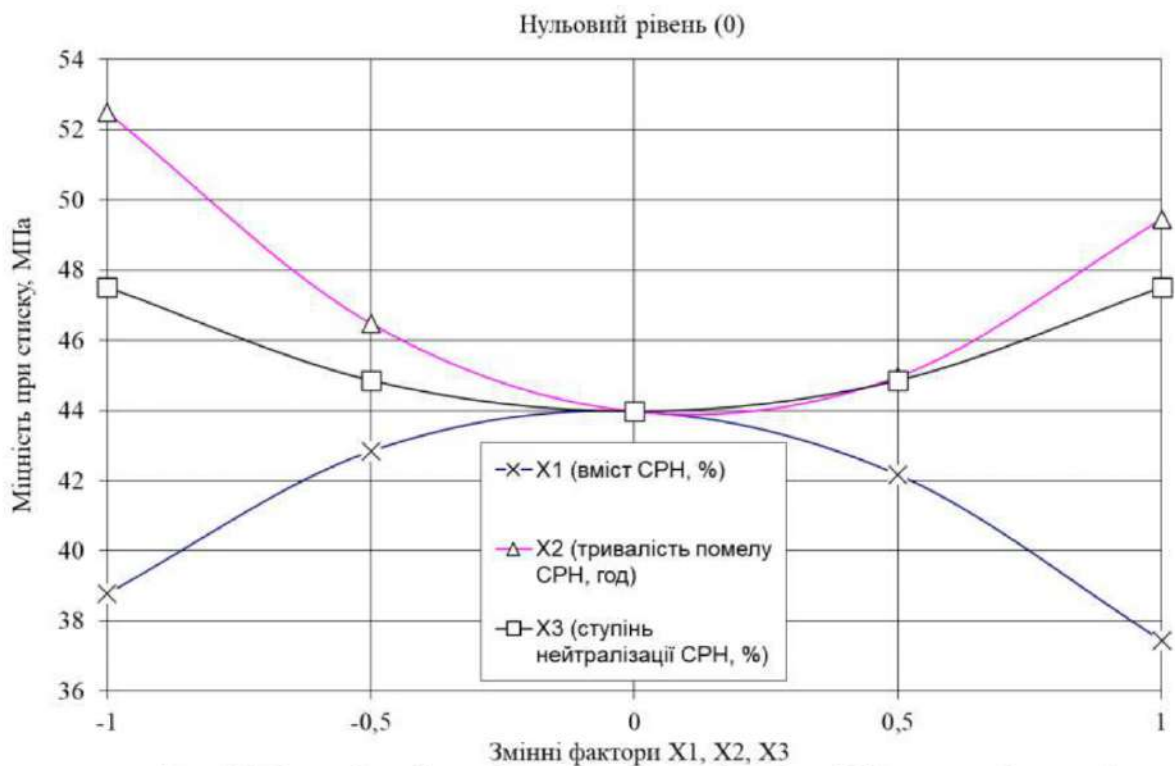


Рис. 5.8 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 1 добовому віці

$$Y_{\text{мщ}} = 43,968 - 0,67X_1 - 1,52X_2 + 0,55X_3 - 5,848X_1^2 + 7,002X_2^2 + 3,552X_3^2 - 3,363X_1X_2 - 1,713X_1X_3 - 1,638X_2X_3;$$

$$F_p < F_T \quad (18,9 < 19,3)$$

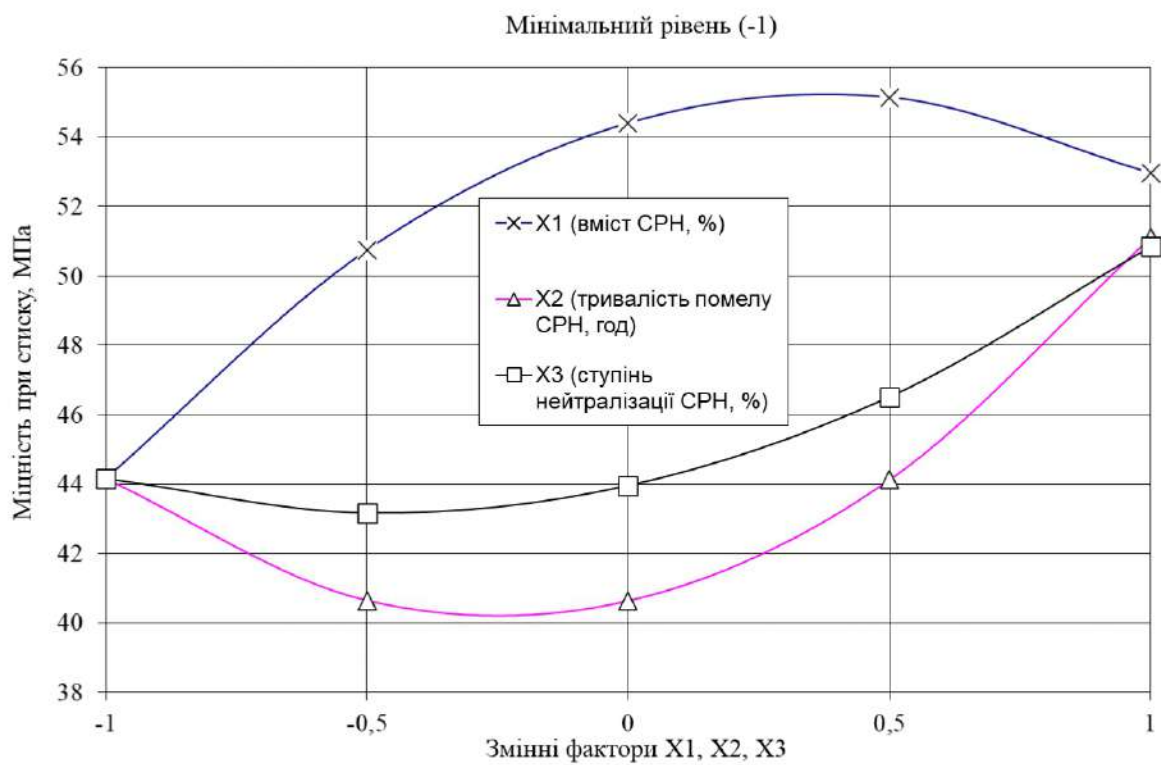


Рис. 5.9 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 1 добовому віці

$$Y_{\text{міц.}} = 43,968 - 0,67X_1 - 1,52X_2 + 0,55X_3 - 5,848X_1^2 + 7,002X_2^2 + 3,552X_3^2 - 3,363X_1X_2 - 1,713X_1X_3 - 1,638X_2X_3;$$

$$F_p < F_T (18,9 < 19,3)$$

Характеристики міцності одержаних зразків
Термін твердіння 1 доба

№ дошт.	№ зразка	Розміри, см	Площа перерізу, см ²	Руйнівне навантаження, кгс	Міцність при стиску	
					кгс/см ²	МПа
1	2	3	4	5	6	7
1	1	3x3,2	9,6	3900	406,1	41,4
	2	3x3,2	9,6	3550	369,7	37,7
	3	3x3,2	9,6	2900	-	-
Середнє значення		-	-	-	386	39,6
2	1	3x3,2	9,6	4000	-	-
	2	2,9x3,2	9,3	4500	483,2	49,4
	3	3x3,2	9,6	5600	583,3	59,5
Середнє значення		-	-	-	533,1	54,4
3	1	3x2,8	8,4	4900	583	59,4
	2	3x2,9	8,7	4600	529	54,0
	3	3x2,9	8,7	4400	-	-
Середнє значення		-	-	-	556	56,7
4	1	2,9x3,2	9,3	4800	516	52,7
	2	3x3,2	9,6	4200	-	-
	3	2,9x3,2	9,3	4200	452	46,1
Середнє значення		-	-	-	484	49,4
1	2	3	4	5	6	7
5	1	3x3,2	9,6	4700	489,6	50,0
	2	3x3	9,0	4200	466,6	47,6
	3	3x3	9,0	3300	-	-
Середнє значення		-	-	-	478,1	48,8
6	1	2,9x3	8,7	4100	471,3	48,1
	2	2,9x3	8,7	4000	-	-
	3	2,9x3	8,7	4100	471,3	48,1

Середнє значення		-	-	-	471,3	48,1
7	1	3x3	9,0	4050	-	-
	2	3x3,1	9,3	4700	505	51,5
	3	3x3,1	9,3	4550	489	49,9
Середнє значення		-	-	-	497	50,7
8	1	3x3,1	9,3	4050	435	44,4
	2	3x3,1	9,3	4200	452	46,1
	3	3x3,1	9,3	4000	-	-
Середнє значення		-	-	-	443	45,2
9	1	3x3,1	9,3	3200	344,1	35,1
	2	3x3,1	9,3	2200	-	-
	3	3x3,1	9,3	3000	322,6	32,9
Середнє значення		-	-	-	333,3	34,0
10	1	3x3,1	9,3	3600	387,1	39,5
	2	3x3,2	9,6	3700	385,4	39,3
	3	3x3,2	9,6	3400	-	-
Середнє значення		-	-	-	386,2	39,4
11	1	3x3,1	9,3	3700	-	-
	2	2,9x3,2	9,3	4200	451,6	46,1
	3	3,1x3,2	9,9	4800	480,0	49,0
Середнє значення		-	-	-	465,8	47,5

1	2	3	4	5	6	7
12	1	3x3	9,0	4750	528	53,8
	2	3x3,1	9,3	3800	-	-
	3	3x3,1	9,3	4500	484	49,4
Середнє значення		-	-	-	506	51,6
13	1	3x3,1	9,3	3800	408,6	41,7
	2	3x3,1	9,3	4450	478,5	48,8
	3	3x3	9,0	3600	-	-
Середнє значення		-	-	-	443,5	45,2
14	1	3x3	9,0	4400	488,9	50,0
	2	3x3,2	9,6	4150	432,3	44,1
	3	3x3,2	9,6	4100	-	-
Середнє значення		-	-	-	460,6	47,0
15	1	2,9x3,2	9,3	4000	430,1	43,9
	2	3x3,2	9,6	3450	-	-
	3	2,9x3,2	9,3	4250	457	46,6
Середнє значення		-	-	-	443,5	45,2
16	1	3x3,1	9,3	3400	-	-
	2	2,9x3,1	9,0	3650	405,5	41,4
	3	3x3	9,0	4600	511,1	52,2
Середнє значення		-	-	-	458,3	46,8
17	1	2,9x3,1	9,0	4100	455,5	46,5
	2	3x2,9	8,7	3800	436,8	44,6
	3	3,1x3	9,3	3550	-	-
Середнє значення		-	-	-	446,2	45,5

5.2.3 Вплив складу добавок на тривалість тужавлення портландцементу (2 доби)

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

$$Y_{\text{міц.}} = 62,393 - 1,15X_1 + 2X_2 - 0,2X_3 - 5,011X_1^2 + 0,339X_2^2 + 3,939X_3^2 - 0,35X_1X_2 - 1,275X_1X_3 - 0,1X_2X_3;$$

$$F_p < F_T (18,1 < 19,3)$$

На рис. 5.10–5.12 показано вплив змінних факторів на міцність портландцементу після 28 діб твердіння. Аналіз графіків свідчить, що найбільший вплив на міцність має вміст добавки, тоді як ступінь нейтралізації гідратованого цементу відіграє менш значну роль.

При максимальному рівні факторів найвища міцність досягається за умов: вміст СРН – 4%, тривалість помелу СРН – 5 год, ступінь нейтралізації – 75%.

На середньому рівні факторів максимальна міцність спостерігається при вмісті добавки – 2% та тривалості помелу добавки – 5 год. При мінімальному рівні факторів найкращі показники міцності отримані за вмісту добавки – 1%, тривалості помелу СРН – 5 год, ступені нейтралізації – 25%.

Таблиця 5.4

Характеристики міцності одержаних зразків Термін твердіння 2 доби

№ Досл.	№ зразка	Розміри, см	Площа перерізу, см ²	Руйнівне навантаження, кгс	Міцність при стиску	
					кгс/см ²	МПа
1	2	3	4	5	6	7
1	1	3x3,1	9,3	4500	-	-
	2	3x3,2	9,6	5700	593,7	60,5
	3	3x3,1	9,3	5150	553,8	56,5
Середнє значення		-	-	-	573,7	58,5

1	2	3	4	5	6	7
2	1	2,9x3,2	9,3	6400	688,2	70,2
	2	3x3,1	9,3	4900	-	-
	3	2,9x3,1	9,0	5800	644,4	65,8
Середнє значення		-	-	-	666,3	68,0
3	1	2,9x3,1	9,0	5600	622,2	63,5
	2	3x3,1	9,3	5100	548,4	55,9
	3	3x3,2	9,6	4200	-	-
Середнє значення		-	-	-	585,3	59,7
4	1	3x3,2	9,6	5500	573	58,5
	2	3x3,2	9,6	5400	562	57,3
	3	2,9x3,1	9,0	4900	-	-
Середнє значення		-	-	-	567,5	57,9
5	1	3,1x3,1	9,6	5800	604,1	61,6
	2	3x3	9,0	4750	-	-
	3	2,9x3	8,7	6350	729,9	74,5
Середнє значення		-	-	-	667	68,1
6	1	3x3	9,0	4350	-	-
	2	3x3	9,0	5250	583,3	59,5
	3	3x3,1	9,3	6000	645,1	65,8
Середнє значення		-	-	-	614,2	62,6
7	1	3x3	9,0	4800	533,3	54,4
	2	3x3,1	9,3	5800	623,6	63,6
	3	3x3,1	9,3	4700	-	-
Середнє значення		-	-	-	578,5	59,0
8	1	3x3,1	9,3	5900	634,4	64,7
	2	3x3,1	9,3	5400	580,6	59,2
	3	3x3,1	9,3	5100	-	-
Середнє значення		-	-	-	607,5	62,0

1	2	3	4	5	6	7
9	1	3x3,1	9,3	3900	-	-
	2	2,9x3,1	9,0	4250	472,2	48,2
	3	3x3,1	9,3	5350	575,3	58,7
Середнє значення		-	-	-	523,7	53,4
10	1	3x3,1	9,3	5550	596,8	60,9
	2	3x3,2	9,6	5500	572,9	58,5
	3	3x3,1	9,3	4250	-	-
Середнє значення		-	-	-	584,8	59,7
11	1	2,9x3,2	9,3	5200	-	-
	2	3x3,1	9,3	6000	645,1	65,8
	3	3x3,2	9,6	5600	583,3	59,5
Середнє значення		-	-	-	614,2	62,6
12	1	3x3	9,0	5000	555,5	56,7
	2	3x3	9,0	5800	644,4	65,7
	3	3x3,1	9,3	4900	-	-
Середнє значення		-	-	-	600	61,2
13	1	3x3	9,0	5250	-	-
	2	3x3	9,0	5800	644,4	65,7
	3	2,9x3,1	9,0	6250	694,4	70,9
Середнє значення		-	-	-	669,4	68,3
14	1	3x3,2	9,6	5300	-	-
	2	3x3,1	9,3	5750	618,3	63,1
	3	3x3	9,0	5500	611,1	62,3
Середнє значення		-	-	-	614,7	62,7
15	1	2,9x3,1	9,0	5200	577,7	58,9
	2	2,9x3,1	9,0	5100	-	-
	3	2,9x3,2	9,3	6250	672,0	68,5
Середнє значення		-	-	-	624,8	63,7

1	2	3	4	5	6	7
16	1	3x3	9,0	5100	566,7	57,8
	2	3x3,1	9,3	6150	661,3	67,5
	3	3x3	9,0	5050	-	-
Середнє значення		-	-	-	614	62,6
17	1	3x3,2	9,6	5300	-	-
	2	2,9x3,2	9,3	5900	634,4	64,7
	3	3x3	9,0	5600	622,2	63,5
Середнє значення		-	-	-	628,3	64,1

5.2.4 Залежність міцності ПЦ від вмісту добавки (у віці 7 діб)

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

$$Y_{\text{міц}} = 72,063 - 4,67X_1 + 2,98X_2 - 1,35X_3 - 3,953X_1^2 + 4,797X_2^2 + 3,247X_3^2 + 4,163X_1X_2 + 0,438X_1X_3 + 4,263X_2X_3$$

$$F_p < F_T (18,9 < 19,3)$$

Зміна міцності портландцементу у 7-добовому віці залежно від дозування високодисперсної мінеральної добавки (СРН), часу її подрібнення та рівня нейтралізації гідратованого цементу проілюстрована на рисунках 5.13–5.15. Узагальнення отриманих результатів показує, що визначальний вплив на формування міцності має саме кількість введеної високодисперсної мінеральної добавки (СРН), тоді як тривалість її помелу відіграє другорядну роль.

За граничних значень досліджуваних параметрів найбільша міцність цементного каменю досягається при введенні 4% високодисперсної мінеральної добавки (СРН), її помелі протягом 6 годин та нейтралізації 75% гідроксиду кальцію. За середнього рівня факторів оптимальні показники спостерігаються при вмісті ДОБАВКИ 2,25%, тривалості помелу 6 годин і ступені нейтралізації 25%. У разі мінімальних значень параметрів найкращі результати міцності забезпечуються при дозуванні високодисперсної

мінеральної добавки (СРН) 2%, помелі протягом 1 годин та нейтралізації на рівні 25%.

Отримані залежності підтверджують, що саме концентрація мінеральної добавки є ключовим чинником, який визначає міцнісні характеристики портландцементу на ранньому етапі твердіння, тоді як вплив інших технологічних параметрів проявляється менш інтенсивно.

Результати випробувань на міцність портландцементу у 7-денному віці віці представлені в таблиці 5.5.

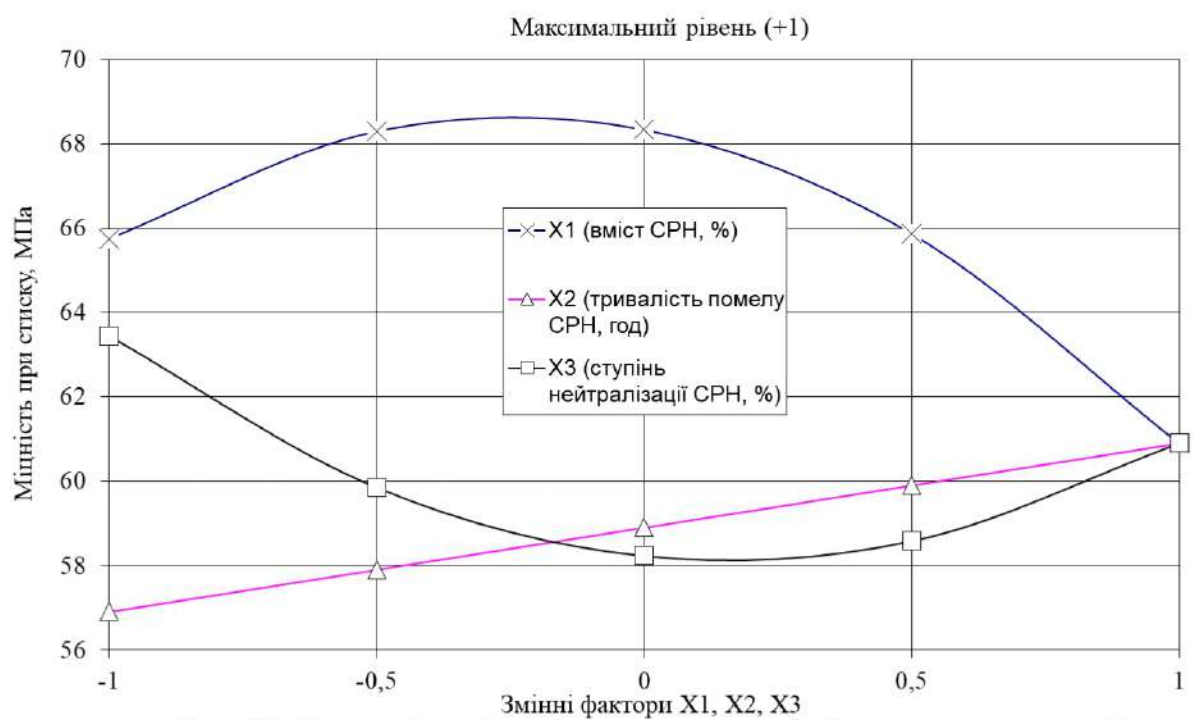


Рис. 5.10 Вплив змінних факторів експерименту на міцність портландцементу в 28 добовому віці

$$Y_{\min} = 62,393 - 1,15X_1 + 2X_2 - 0,2X_3 - 5,011X_1^2 + 0,339X_2^2 + 3,939X_3^2 - 0,35X_1X_2 - 1,275X_1X_3 - 0,1X_2X_3;$$

$$F_p < F_T (18,1 < 19,3)$$

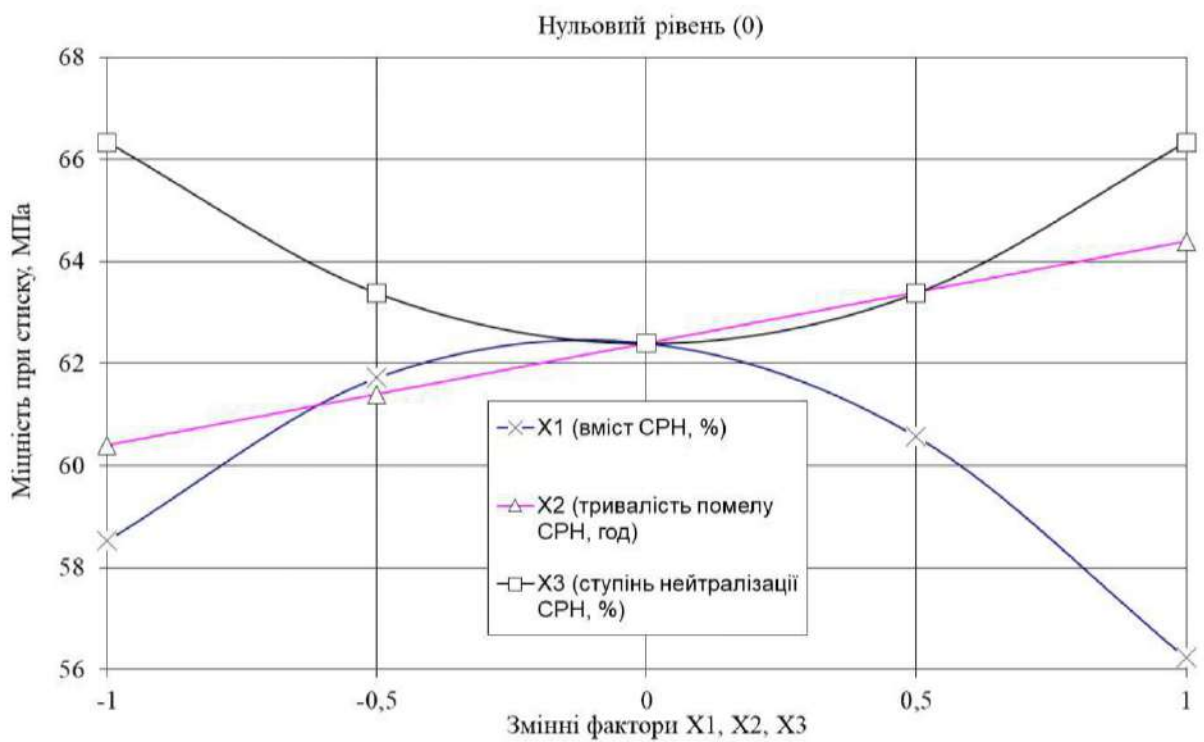


Рис. 5.11 Вплив змінних факторів експерименту на міцність портландцементу в 28-добовому віці

$$Y_{\text{min.}} = 62,393 - 1,15X_1 + 2X_2 - 0,2X_3 - 5,011X_1^2 + 0,339X_2^2 + 3,939X_3^2 - 0,35X_1X_2 - 1,275X_1X_3 - 0,1X_2X_3;$$

$$F_p < F_T \quad (18,1 < 19,3)$$

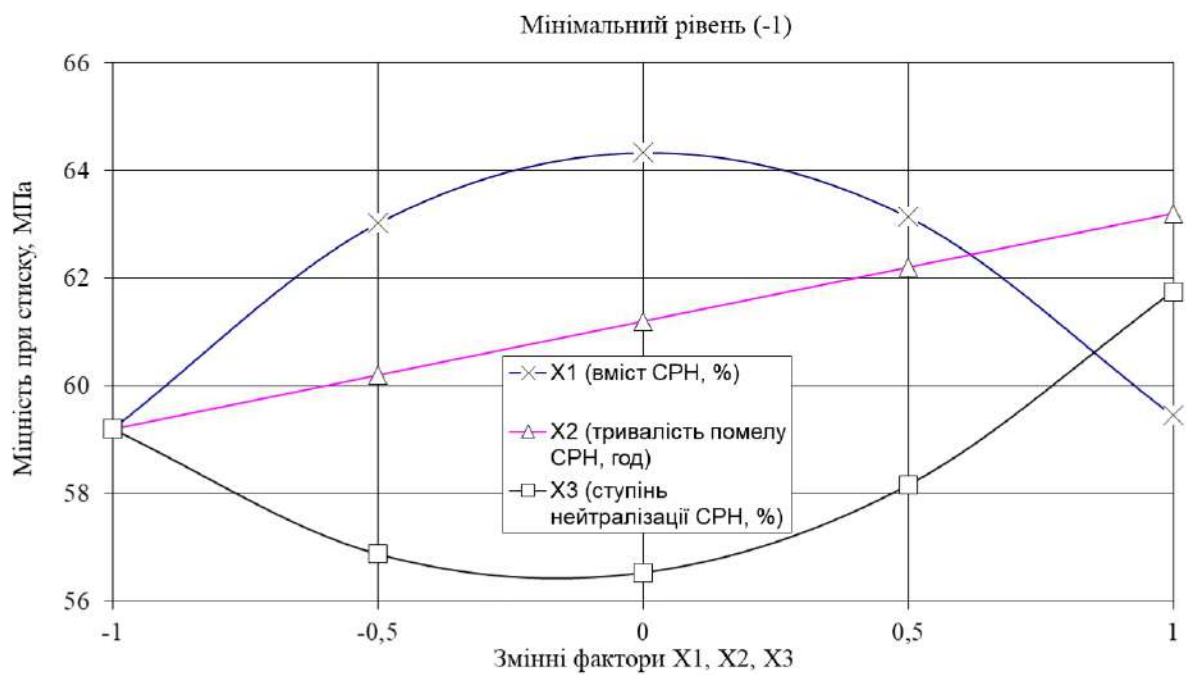


Рис. 5.12 Вплив змінних факторів експерименту на міцність портландцементу в 2^х добовому віці

$$Y_{\min} = 62,393 - 1,15X_1 + 2X_2 - 0,2X_3 - 5,011X_1^2 + 0,339X_2^2 + 3,939X_3^2 - 0,35X_1X_2 - 1,275X_1X_3 - 0,1X_2X_3;$$

$$F_p < F_T (18,1 < 19,3)$$

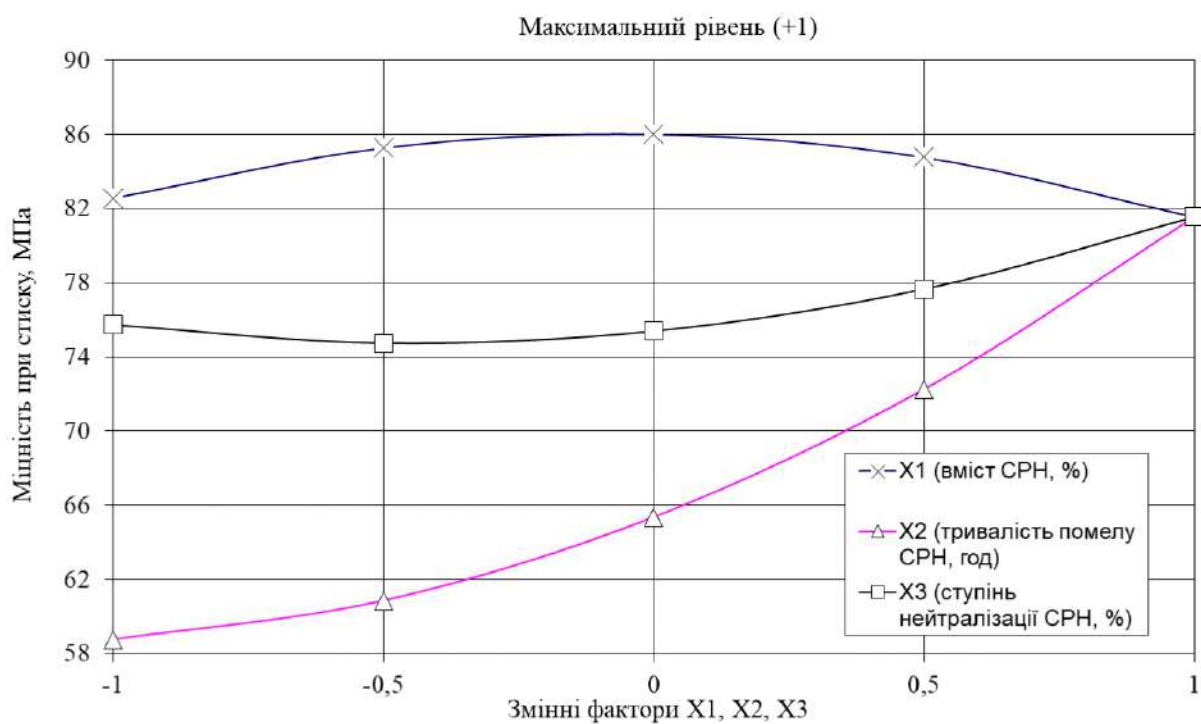


Рис. 5.13 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 7 добовому віці

$$Y_{\min} = 72,063 - 4,67X_1 + 2,98X_2 - 1,35X_3 - 3,953X_1^2 + 4,797X_2^2 + 3,247X_3^2 + 4,163X_1X_2 + 0,438X_1X_3 + 4,263X_2X_3;$$

$$F_p < F_T (18,9 < 19,3)$$

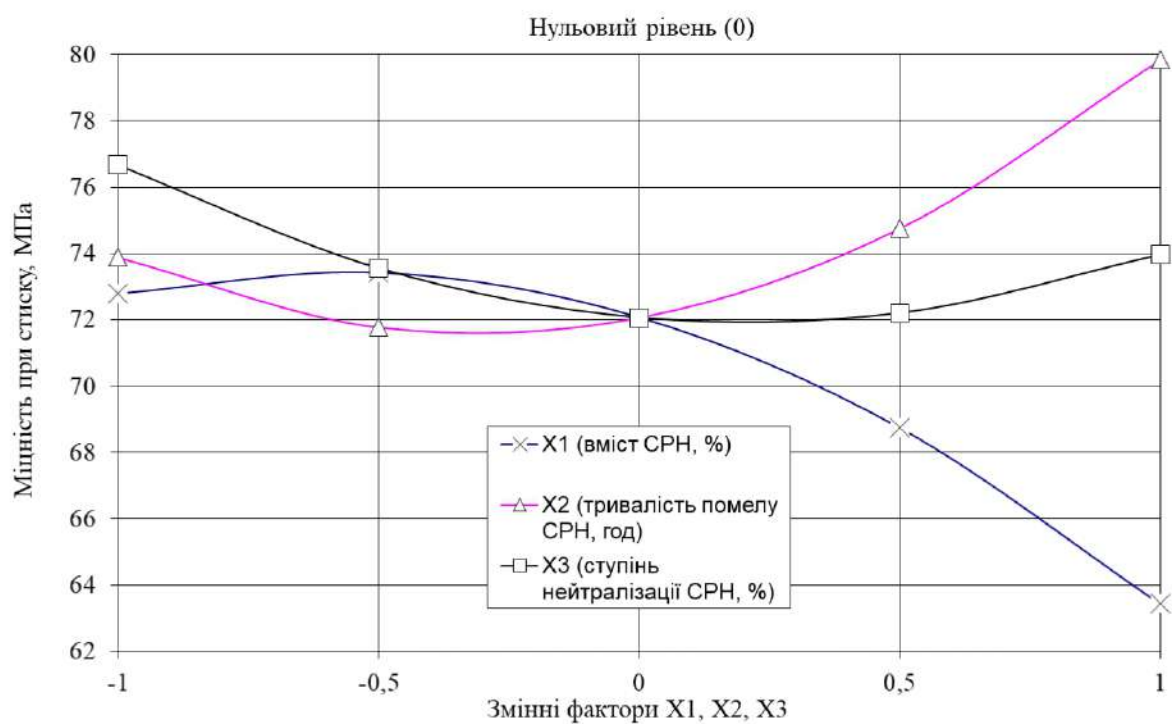


Рис. 5.14 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 7 добовому віці

$$Y_{\text{мц}} = 72,063 - 4,67X_1 + 2,98X_2 - 1,35X_3 - 3,953X_1^2 + 4,797X_2^2 + 3,247X_3^2 + 4,163X_1X_2 + 0,438X_1X_3 + 4,263X_2X_3;$$

$$F_p < F_T (18,9 < 19,3)$$

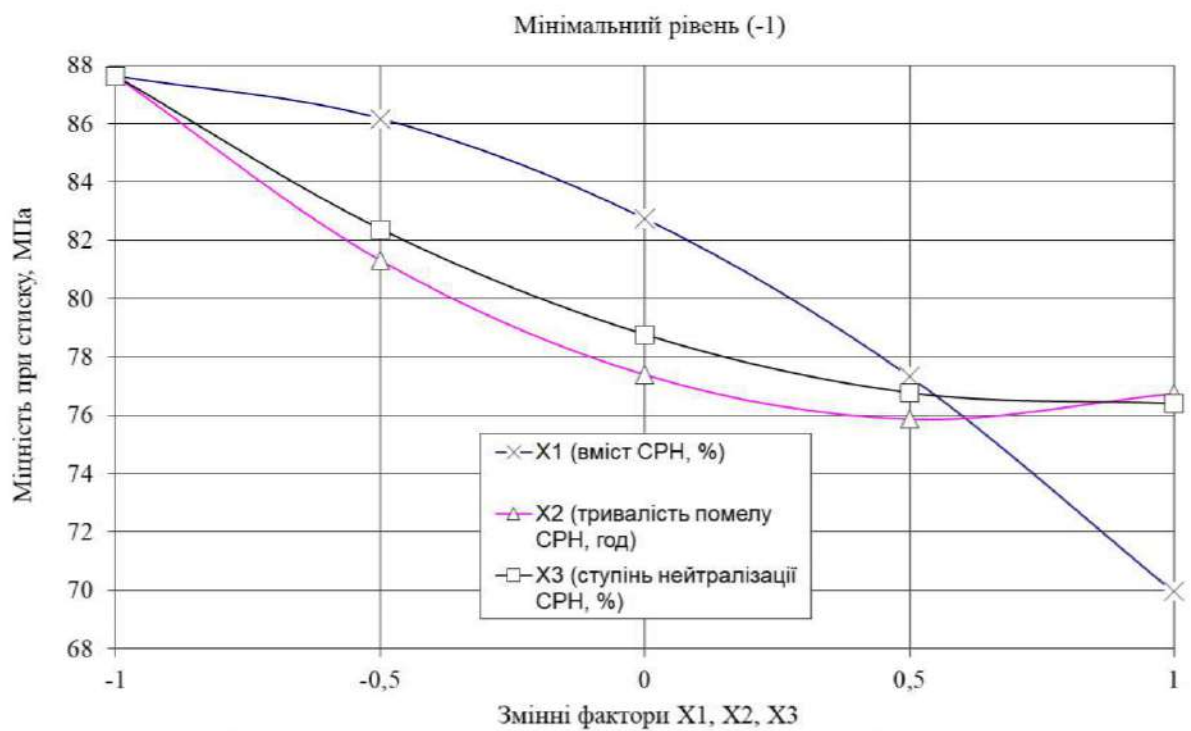


Рис. 5.15 Залежність міцності поргладцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 7 добовому віці

$$Y_{\text{мц}} = 72,063 - 4,67X_1 + 2,98X_2 - 1,35X_3 - 3,953X_1^2 + 4,797X_2^2 + 3,247X_3^2 + 4,163X_1X_2 + 0,438X_1X_3 + 4,263X_2X_3;$$

$$F_p < F_T (18,9 < 19,3)$$

5.2.5 Вплив добавки на міцність цементу (28 діб)

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

$$Y_{\text{міц}} = 89,4 - 0,65X_1 + 2,46X_2 + 0,52X_3 - 6,413X_1^2 + 4,037X_2^2 + 1,537X_3^2 + 2,338X_1X_2 + 9,363X_1X_3 - 0,138X_2X_3;$$
$$F_p < F_T \quad (19,0 < 19,3)$$

На рис. 5.16–5.18 наведено результати дослідження впливу змінних факторів на міцність портландцементу після 28 діб тверднення. Аналіз отриманих графічних залежностей свідчить, що визначальним фактором, який найбільш суттєво впливає на міцність цементного каменю, є вміст високодисперсної мінеральної добавки (СРН), тоді як ступінь нейтралізації гідратованого цементу відіграє менш значну роль.

За максимального рівня варіювання факторів найвищі показники міцності досягаються за таких умов: вміст ДОБАВКИ – 3%, тривалість помелу високодисперсної мінеральної добавки (СРН) – 5 год, ступінь нейтралізації – 75%.

На середньому рівні факторів максимальна міцність спостерігається при вмісті високодисперсної мінеральної добавки (СРН) 1% та тривалості її помелу 5 год.

За мінімального рівня факторів найкращі показники міцності отримано при вмісті високодисперсної мінеральної добавки (СРН) 1%, тривалості помелу 6 год та ступені нейтралізації 25%.

Дані щодо міцності зразків після 28 діб тверднення наведено в таблиці 5.6.

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

6.1. Бетонні роботи

Під час виконання робіт з приготування, транспортування, укладання та догляду за бетоном і будівельними розчинами, а також при заготівлі, монтажі арматурних конструкцій та встановленні чи демонтажі опалубних систем, необхідно передбачати заходи з мінімізації ризиків для персоналу від впливу виробничих факторів підвищеної небезпеки та шкідливості відповідно до вимог системи стандартів безпеки праці та нормативних документів у будівництві [94, 96]. До переліку цих ризиків відносяться:

- розташування робочих зон поблизу перепадів висоти, що перевищують 1,3 м;
- рух технологічного обладнання та операції з переміщення вантажів;
- потенційна загроза обвалення елементів будівельних конструкцій та опалубки;
- екстремально підвищена температура арматури під час робіт з попереднім термонапруженням;
- підвищений рівень шуму, вібрації та незадовільне освітлення робочих просторів;
- несприятливі кліматичні умови;
- імовірність ураження персоналу електричним струмом через підвищену напругу в електромережі [96, 99].

Гарантування безпеки при здійсненні бетонних робіт повинно бути забезпечено відповідно до положень проєктної та технологічної документації, а також вимог організації будівельного виробництва [95]. При цьому обов'язково передбачають:

- ідентифікацію небезпечних зон та методикау їх маркування із застосуванням знаків безпеки [100];
- безпечні та ефективні способи механізації процесів приготування,

транспортування, подачі та укладання бетонної суміші [95, 97];

- параметри несучої здатності, міцності та стійкості опалубних систем і регламент їх монтажу та демонтажу [97];
- оптимальну послідовність монтажу арматурних конструкцій;
- комплекс заходів безпеки при виконанні робіт на висоті [96];
- організацію безпечного догляду за бетоном упродовж усього року [97, 98].

Зберігання цементу необхідно організовувати в закритих резервуарах з метою запобігання запиленню під час навантажувально-розвантажувальних робіт відповідно до вимог охорони праці [94, 96]. Завантажувальні отвори повинні бути оснащені захисними ґратами, що унеможливають випадкове потрапляння працівників усередину ємностей.

При застосуванні парового обігріву заповнювачів необхідно виключити проникнення пари до робочих приміщень. Допуск персоналу до парових камер дозволяється лише після повного припинення подачі пари та охолодження обладнання до температури не вище +40 °С [96].

6.2. Виконання будівельних робіт

Підготовчий етап та обов'язки керівника

До того як приступити до бетонування, відповідальна особа має переконатися у безпеці майданчика відповідно до вимог нормативних документів з охорони праці та організації будівельного виробництва [94–96]:

Інспекція конструкцій: перевірити надійність та цілісність опалубки, стійкість риштувань та наявність захисних бар'єрів на робочих рівнях [94, 101].

Справність техніки: проконтролювати робочий стан бетононасосів, маніпуляторів, а також цілісність тари й бункерів [95, 97].

Екіпірування: видати персоналу необхідні сертифіковані засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) [96].

Експлуатація змішувального обладнання

Під час роботи з бетонозмішувачами діють суворі правила очищення відповідно до вимог електробезпеки [96, 99]:

- **прямки** дозволяється чистити лише за умови, що ківш надійно зафіксований;
- будь-які маніпуляції всередині барабанів чи корит можливі тільки після повної зупинки агрегату та знеструмлення мережі [96].

Робота з арматурою

Для безпечної заготівлі та монтажу металевих елементів необхідно дотримуватись таких вимог [96, 101]:

Зонування: огорожувати ділянки, де розмотують бухти або вирівнюють пруту.

Захист від уламків: під час нарізання дрібних деталей (менше 30 см) використовувати спеціальні захисні пристрої [96].

Безпека на верстатах: відокремлювати робочі зони двобічних верстатів сіткою (висотою не менше 1 м) та ізолювати виступаючі частини стержнів [94].

Логістика: зберігати арматуру виключно у визначених зонах, а в місцях проходів (шириною понад 1 м) обов'язково закривати торці прутів [96].

Транспортування: кріплення та підйом арматурних конструкцій краном мають здійснювати лише кваліфіковані стропальники [95].

Монтаж та висотні роботи

Робочі зони: встановлення каркасів для стін чи колон проводиться з огорожених помостів шириною не менше 0,8 м, розташованих із кроком по висоті не більше 2 м [101].

Страхування: при роботі на висоті робоче місце повинно бути огороженим. Якщо це неможливо або поверхня має ухил понад 20°, обов'язковим є використання страхувальних поясів і канатів, закріплених згідно з технологічною картою [96].

Спеціальні умови та завершення монтажу

Зварювання: у приміщеннях, де проводять зварювальні роботи, робочі місця повинні бути захищені вогнетривкими перегородками [96].

Фіксація: арматурні блоки формують у пакети, зручні для підйому та перевезення [95].

Заборона доступу: поки арматурні блоки не будуть остаточно закріплені, перебувати на них або поблизу них суворо заборонено [94].

Пересування територією, де покладена арматура, дозволяється винятково по спеціально змонтованих міцних настилах завширшки не менше 0,6 м, які мають бути надійно зафіксовані на каркасі [101]. Для запобігання травмам усі арматурні випуски з плит, що підіймаються над бетоном на висоту до 1 м, захищаються м'якими трубками або іншими пристосуваннями [96].

Процес зведення монолітних споруд планується таким чином, щоб монтаж сходових кліток не відставав від основних робіт більше ніж на один поверх; усі шляхи підйому персоналу визначаються у Проекті виконання робіт [95].

Робота з бетонною сумішшю, експлуатація бетононасосів, бетоноводів, електровібраторів та виконання електропрогріву бетону здійснюються з обов'язковим дотриманням вимог безпеки праці, електробезпеки та технічних регламентів [96–99].

Погодні обмеження, роботи поблизу ЛЕП, експлуатація гідравлічних маніпуляторів і стріл-розподільників регламентуються чинними правилами охорони праці та допускаються лише за безпечних умов і за участю навченого персоналу [94, 96].

6.3. Вимоги до робочих місць

При бетонуванні перекриттів обов'язковою умовою є встановлення захисних огорожень по всьому периметру опалубки. Будь-які технологічні отвори в настилі мають бути щільно закриті щитами, а ті, що потребують постійного доступу повітря чи світла – міцними ґратами. Зони, де

розташовані опорні стійки опалубки, позначаються заборонними знаками, а доступ сторонніх осіб до них суворо обмежується відповідно до вимог охорони праці та безпеки виконання будівельних робіт [94, 96].

Якщо монтаж стін, колон або ригелів вимагає перебування працівника поза основною підлогою, необхідно заздалегідь облаштувати робочі помости шириною від 0,8 м. Такі конструкції повинні мати суцільне огородження та бути розрахованими на специфічні навантаження, визначені проектною документацією. При роботі з ковзною опалубкою важливо захистити торцеві сторони після демонтажу її частин, а для безпеки людей на підвісних риштуваннях – встановити захисні козирки, що повністю перекривають ширину робочої зони [101].

Усі процеси, пов'язані з переміщенням вантажів, використанням строп та тари для бетону, мають суворо відповідати державним нормам безпеки праці та правилам експлуатації підйимально-транспортного обладнання [94–96]. На ділянках, де відбувається натягування арматури, встановлюються високі захисні бар'єри (не менше 1,8 м), а саме обладнання оснащується звуковою або світловою сигналізацією. Під час термічного нагріву стержнів заборонено наближатися до них ближче ніж на один метр [96].

Збирання великих арматурних каркасів має відбуватися виключно на спеціально підготовлених майданчиках. Якщо до складу бетонної суміші входять хімічні добавки, персонал зобов'язаний використовувати захисні окуляри та рукавички відповідно до вимог безпеки при роботі з хімічними речовинами [96, 99]. Окремі вимоги діють для естакад: вони обладнуються відбійними брусами з обов'язковими проходами для людей (0,6 м), а на тупикових ділянках – поперечними стопорами. Під час очищення кузовів автосамоскидів від залишків бетону працівникам категорично заборонено перебувати безпосередньо в кузові або на ньому [94].

Усі операції з підймання вантажів, використання тари для бетону, роботи з бетононасосами та вібраційним обладнанням виконують з

дотриманням вимог ДСТУ EN щодо виконання бетонних конструкцій та експлуатації обладнання [97, 98].