

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:

### **«Дослідження впливу добавок прискорювачів твердіння на міцність бетону для захисних споруд»**

Виконав:	П.М. Красовський
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 2025**

## ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	6
1.1 Загальні відомості про портландцемент .....	6
1.2 Характеристика хіміко-мінералогічного складу портландцементного клінкеру .....	7
1.3 Гідратація клінкерних мінералів і портландцементу .....	10
1.4 Твердіння бетону – складний фізико-хімічний процес.....	14
1.5 Методи управління структуроутворенням в'язучих речовин.....	15
1.6 Класифікація добавок для бетону.....	17
1.7 Добавки-прискорювачі твердіння бетону.....	22
1.8. Процеси структуроутворення у присутності комплексних добавок .....	27
1.9 Вплив центрів кристалізації на процеси твердіння цементу .....	29
1.10 Висновки літературного огляду.....	30
РОЗДІЛ 2. МЕТА РОБОТИ.....	31
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....	32
3.1 Планування експерименту .....	32
3.2 Приготування розчинів добавок.....	35
3.3 Розрахунок кількості хімічних добавок і води.....	36
3.4 Визначення нормальної густоти цементного тіста.....	39
3.5 Визначення термінів тужавлення .....	40
3.6 Визначення характеристик міцності .....	41
3.7 Визначення температури гідратації цементного тіста .....	43
РОЗДІЛ 4 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	46
4.1 Портландцемент .....	46
4.2 Вода.....	46
4.3 Хімічні добавки .....	47
Таблиця 4.5.....	50
РОЗДІЛ 5 ПОЯСНЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	51
5.1 Вибір оптимального складу комплексної хімічної добавки.....	51
5.1.1 Вплив хімічних добавок на терміни тужавлення і міцність затверділого цементу.....	51
5.2 Розробка способу приготування мінеральної добавки – центру кристалізації.....	56

5.2.1	Залежність термінів тужавлення портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН.....	58
5.2.2	Залежність міцності портландцементу від тривалості помелу СРН, вмісту та ступеня нейтралізації СРН в 1 добовому віці.....	62
5.2.3	Вплив змінних факторів експерименту на міцність портландцементу в 2х добовому віці .....	71
5.2.4	Залежність міцності ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 7 добовому віці.....	75
5.2.5	Вплив мінеральної затравки на міцність цементу через 28 діб твердіння .....	82
5.2.6	Середні значення міцності та терміни тужавлення портландцементу ...	86
5.3	Визначення температури твердіння цементного тіста при екзотермічних процесах .....	88
	<b>РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....</b>	<b>92</b>
6.1.	Бетонні роботи.....	92
6.2.	Порядок виконання робіт .....	93
6.3.	Організація робочих місць .....	98
	<b>РОЗДІЛ 7 ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....</b>	<b>101</b>
	<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>102</b>

## ВСТУП

Бетон, як будівельний матеріал, набув такого розповсюдження, що ні для кого не секрет, що штучний кам'яний матеріал, який складається з раціонально підбраної суміші в'язучого, води, крупного та дрібного заповнювача [1].

Досвід застосування бетону та залізобетонних виробів у всіх галузях будівництва підтверджує, що головною умовою ефективності його роботи і надійності є, не лише якісних показників матеріалу, а і особливості роботи в конструкціях та спорудах.

Урахування цих особливостей необхідне при прийнятті вихідних даних для проектування раціональних складів бетону, які в майбутньому забезпечують комплекс його властивостей, необхідних при проектуванні складів бетону. Незважаючи на те, що проблема визначення оптимальних складів є дасить поширеною, та їй приділяється достатньо багато уваги, протягом усього розвитку науки про бетон, вона відноситься до числа найбільш актуальних проблем вивчення властивостей бетонів і в наш час.

Основною складовою будь-якого бетону є в'язуча речовина, характеристики якої і визначають його властивості, за видом яких розрізняють бетони: цементні, силікатні, гіпсові, шлаколужні, полімербетони, полімерцементні бетони [2].

Найбільш поширені в будівельній практиці цементні бетони, які наділені комплексом цінних фізико-механічних властивостей, – здатністю тверднути й нарощувати міцність, як на повітрі, так і у воді, стійкістю до багатьох агресивних середовищ, придатністю до виготовлення різноманітних за формою і призначенням конструкцій та споруд

Але слід не забувати, що для коригування певних властивостей бетону й бетонної суміші до їх складу можуть вводити різні хімічні добавки, які змінюють терміни тужавіння бетонної суміші, коригують її пластичність, прискорюють швидкість твердіння бетону, підвищують його міцність та

морозостійкість, а також за необхідності змінюють у потрібному напрямку інші спеціальні його властивості [3].

До бетону пред'являється ряд вимог, виконати які найчастіше неможливо без використання так званих модифікаторів і пластифікаторів, тобто хімічних добавок, що дозволяють додати бетонній суміші властивості, що забезпечують вимоги як проектувальників, так виконавців робіт.

В технології бетону спостерігається тенденція до розробки і використання комплексних добавок в бетон, які відрізняються поліфункціональністю своєї дії. Вони впливають одночасно на декілька характеристик бетону: термін тужавіння, рухливість, темпи росту міцності, тепловиділення, корозійну стійкість та ін.

Застосування багатьох добавок не обмежується тільки бетонами, їх з успіхом можна застосовувати й для поліпшення характеристик цементно-піщаних розчинів.

Ідеал будівельників – бетонні суміші, які мають високу рухливість, уповільнене тужавіння й швидкий набір міцності, універсальність застосування, одержання конструкцій, які не потребують значних витрат на гідроізоляційні роботи. При цьому не слід забувати, що основним завданням є забезпечення необхідної міцності й довговічності бетонної конструкції, тобто можливістю тривалий час протистояти механічним навантаженням, хімічних і фізичних дій навколишнього середовища. Тому застосування добавок в сучасному будівництві не тільки рекомендується, але й просто життєво необхідно.

Очевидно, що використання модифікаторів бетону вигідно як технологічно, так економічно. Застосування добавок дозволяє знизити енерговитрати на укладання бетону, зменшити витрату цементу, зберегти високу рухливість суміші, збільшити довговічність конструкцій, домогтися відмінних показників ранньої та кінцевої міцності бетону.

## РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Загальні відомості про портландцемент

Портландцемент – гідравлічна в'язуча речовина, яку виготовляють спільним тонким подрібненням клінкеру з гіпсом або іншими добавками.

Перший патент на спосіб виробництва штучного каменю під назвою портландський цемент було отримано у 1824 році Джозефом Аспдіном. За минулі роки поліпшилась якість портландцементу, його середня міцність виросла майже у 10 разів, що є результатом не тільки модернізації технології, але й зміни складу шихти для отримання клінкеру. У практиці світового будівництва портландцемент є головним матеріалом для виробництва бетону, залізобетону та будівельних розчинів.

Портландцементний клінкер отримують випалюванням до спікання (при температурі приблизно 1450°C) сировинної суміші певного складу, що забезпечує синтез переважно високоосновних силікатів кальцію. Гіпс до складу портландцементу вводять для регулювання строків тужавлення й підвищення міцності.

Сировиною для виготовлення портландцементного клінкеру можуть бути карбонатні породи (приблизно 75%) в суміші з алюмосилікатними речовинами (25%). Як карбонатні породи використовують вапняки, крейду, вапняки-черепашники, вапнякові туфи, а як алюмосилікатний компонент – глини, але при відповідному економічному обґрунтуванні можна застосовувати суглинки, леси, аргіліти та глинисті сланці. Також як сировину використовують природні суміші вапняків із глинами – мергелі.

До найпоширеніших побічних продуктів, придатних для виробництва портландцементного клінкеру, відносять доменні гранульовані шлаки, які завдяки хімічному складу ( $\text{SiO}_2$  – 38...40%,  $\text{CaO}$  – 43...44%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 5...14%) іноді використовуються замість частини глинистого або карбонатного компонентів.

З метою коригування складу шихти також застосовують електоротермофосфорні шлаки, паливні золи, відходи вуглезбагачення та різні шлами, в тому числі нефеліновий (білітовий), монокальцієвий і червоний [3].

## **1.2 Характеристика хіміко-мінералогічного складу портландцементного клінкеру**

Під час випалювання сировинної суміші відбуваються фізичні та фізико-хімічні перетворення у складі шихти, що приводять до спікання та формування зерен клінкеру розміром 20...30 мм, мінералогічний та хімічний склад яких різко відрізняється від складу вихідної сировини.

Хімічний склад клінкеру представлений чотирма основними оксидами, мас. %: CaO – 63...67; SiO<sub>2</sub> – 20...24; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4...9; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2...4. Їхній загальний вміст становить 95...97%; в невеликій кількості залежно від виду сировини, що застосовується, в клінкері містяться також MgO, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> та ін. Під час аналізу якості клінкеру визначають не тільки загальну кількість окремих оксидів, але й ступінь зв'язування CaO і SiO<sub>2</sub>.

Наявність у складі клінкеру *оксиду кальцію* CaO (при умові його повного зв'язування у силікатні та алюмосилікатні сполуки) обумовлює високу міцність та швидке твердіння цементу.

*Оксид кремнію* SiO<sub>2</sub> зв'язує CaO в силікати, здатні до гідравлічного твердіння. Збільшення вмісту SiO<sub>2</sub> у клінкері викликає сповільнення тужавіння та твердіння, в той же час такі цементи мають високу міцність в пізні строки твердіння, їх класифікують як цементи з помірним тепловиділенням, що відрізняються водо- і сульфатостійкістю.

Підвищення у складі клінкеру оксиду алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> зумовлює швидке тужавіння і прискорене твердіння цементу, але одночасно негативно впливає на сульфато- та морозостійкість.

*Оксид заліза* Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> є не тільки фарбувальним оксидом, але й плавнем, що поліпшує спікання клінкеру. Цементи з підвищеним вмістом Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і малим вмістом глинозему характеризуються достатньо високою сульфатостійкістю.

За швидкістю зростання міцності вони наближаються до висококремнеземистих.

*Оксиди калію та натрію* негативно впливають на процеси гідратації цементу, призводять до утворення висолів на поверхні виробів. Крім того, луги здатні до взаємодії з активним кремнеземом заповнювачів і викликають надлишкове розширення та руйнування будівельного розчину і бетону. Ось чому в цементах, наприклад, для гідротехнічного будівництва, кількість лужних оксидів не повинна перевищувати 0,6%.

У процесі випалювання сировинної суміші до спікання ( $T=1450^{\circ}\text{C}$ ) утворюються чотири основні мінерали (фази) цементного клінкеру: трикальцієвий силікат  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – *аліт*; двокальцієвий силікат  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – *беліт*; трикальцієвий алюмінат  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ; *чотирикальцієвий алюмоферит*  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Скорочений умовний запис цих мінералів відповідно такий:  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ . Звичайно, це не чисті мінерали, а тверді розчини, склад і будова яких залежить від складу сировинної суміші, тонкості її помелу, режиму термічної обробки та багатьох інших факторів.

Відносний вміст цих мінералів у портландцементному клінкері може бути в таких межах, %:  $\text{C}_3\text{S}$  – 45...60;  $\text{C}_2\text{S}$  – 20...30;  $\text{C}_3\text{A}$  – 4...14;  $\text{C}_4\text{AF}$  – 10...18. Крім кристалічних мінералів, у складі клінкеру ідентифікують периклаз  $\text{MgO}$ , вільний оксид кальцію  $\text{CaO}$  та клінкерне скло, яке має змінний склад та містить підвищену кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

**Аліт  $\text{C}_3\text{S}$**  є найважливішою фазою клінкеру і представлений твердим розчином, що модифікований іонами  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ . Форма кристалів пластинчаста або шестикутна. Аліт швидко реагує з водою і відіграє головну роль у синтезі міцності штучного каменю, особливо на ранніх стадіях твердіння.

**Беліт  $\text{C}_2\text{S}$**  зазвичай існує у вигляді  $\beta$ -модифікації. Ця фаза повільно реагує з водою і не впливає на міцність штучного каменю на ранніх стадіях гідратації. В пізні строки твердіння (після 1 року) міцнісні характеристики

зразків, що отримані на основі гідратованих в однакових умовах аліту та беліту, майже не відрізняються.

Вміст мінералів-силікатів у клінкері становить приблизно 75%, а решту 25% становить проміжна речовина або фаза, яка заповнює об'єм між кристалами аліту і беліту. Ця фаза може бути представлена алюмоферитами кальцію, кристалами  $C_3A$  та клінкерним склом, що не встигло закристалізуватись. Залежно від швидкості охолодження вміст склоподібної фази може змінюватись від 1 до 22%, в нормально охолоджених клінкерах утворюється приблизно 6...12% скла. Склоподібна фаза має різний склад, в якому завжди є деяка кількість оксидів  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ .

На фізико-механічні властивості цементу впливає не тільки мінералогічний склад клінкеру, але й розмір та форма зерен окремих мінералів. Найсприятливішою є дрібнокристалічна структура мінералів, що синтезується при швидкому охолодженні клінкеру.

**Трикальцієвий алюмінат  $C_3A$**  – фаза кубічної сингонії, структура якої модифікована за рахунок присутності іонів  $Si^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ . Вона входить до складу клінкеру як проміжна речовина, представлена складними твердими розчинами, що швидко піддаються гідратації та твердінню з утворенням штучного каменю невеликої міцності. Наявність трикальцієвого алюмінату може бути причиною виникнення сульфатної корозії бетону.

**Чотирикальцієвий алюмоферит  $C_4AF$**  – феритна фаза, модифікована різними іонами, входить до складу клінкеру як проміжна речовина.

**Оксид магнію** піддається повільній гідратації з утворенням  $Mg(OH)_2$ , що призводить до збільшення об'єму. Якщо його вміст у клінкері перевищує 5%, то він може бути причиною нерівномірності зміни об'єму цементу та розтріскування бетону.

**Оксид кальцію** перебуває у клінкері у вільному стані, вміст його не повинен перевищувати 1%, оскільки, перехід  $CaO$  в гідратну форму  $Ca(OH)_2$  призводить до нерівномірної зміни об'єму та руйнування бетону або будівельного розчину.

За мінералогічним складом є такі види портландцементу: високоалітовий –  $C_3S > 60\%$ ; алітовий –  $C_3S - 50...60\%$ ; белітовий –  $\beta-C_2S > 35\%$ ; алюмінатний –  $C_3A > 12\%$ ; алюмоферитний –  $C_3A < 2\%$ ,  $C_4AF > 18\%$  [3].

### 1.3 Гідратація клінкерних мінералів і портландцементу

В основі цементуючої речовини портландцементу лежать гідратовані з'єднання вихідних матеріалів. Однак гідратованих з'єднань значно більше, ніж тих, що забезпечують твердіння неорганічним матеріалам [4].

Портландцемент включає, з одного боку  $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_2S$ ,  $C_4AF$  і  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , з іншого – кристалічну й скловидну фазу. При помелі в цемент вводять мінеральні добавки, а сам клінкер вміщує різні домішки. Тому процеси твердіння досить складні.

Внаслідок змішування цементу з водою відбувається його гідратація, яка призводить до тужавлення та твердіння цементного тіста з утворенням штучного (цементного) каменю.

*Тужавлення* портландцементного тіста – це втрата його пластичності без значного розвитку міцності штучного каменю, що утворюється.

*Твердіння* обумовлене комплексом хімічних, фізико-хімічних та фізичних процесів, які мають місце при взаємодії клінкерних мінералів з водою, і пов'язані із структуроутворенням та нарощуванням міцності штучного каменю у часі.

При взаємодії цементу з водою слід розрізняти первинні й вторинні реакції. Первинні хімічні процеси – це взаємодія вихідних клінкерних мінералів з водою, вторинні – хімічні реакції гідратованих новоутворень один із одним, з гіпсом, неорганічними солями тощо.

На сьогодні отримані фундаментальні дані щодо механізму твердіння цементу. На їхній основі розроблені й використовуються в технології отримання бетону методи, які дозволяють впливати на процес твердіння цементу й властивості бетону.

#### Гідратація $C_3S$

Трикальцієвий силікат – найважливіший компонент портландцементного клінкеру, з ним пов'язана більшість технічних властивостей затверділого цементного каменю, тому вивченню процесів його гідратації присвячено дуже багато літератури. Однак, не дивлячись на різноманітність методів дослідження (електронна растрова мікроскопія, калориметрія, аналіз рідкої фази, ІЧ-спектроскопія, термолюмінесценція), механізм реакції  $C_3S$  з водою остаточно ще не встановлений.

*Аліт* піддається гідратації з утворенням *гідросилікатів кальцію та портландиту*:



На гідратацію  $C_3S$ , як і інших клінкерних мінералів, впливає температура (із зміною температури змінюється ступінь гідратації), розмір кристалів, а в деяких випадках і склад новоутворень. Так, при нормальному В/Т ступінь гідратації  $C_3S$  через 12 год при  $5^\circ C$  становить 0, при  $20^\circ C$  – 30%, при  $50^\circ C$  – 60%.

Під час гідратації  $C_3S$  за гідротермальних умов склад продуктів реакції змінюється. При температурі  $80-120^\circ C$  кінцевим продуктом гідратації  $C_3S$  є  $C_2SH$  (B), в інтервалі  $120-175^\circ C$  –  $C_2SH$  (A) і  $Ca(OH)_2$ , в інтервалі  $175-200^\circ C$  – суміш  $C_2SH_2$ ,  $C_2SH$  (A),  $C_2SH$  (C) і  $Ca(OH)_2$ . При температурах понад  $200^\circ C$   $C_2SH$ (C) і  $Ca(OH)_2$ , що утворились спочатку, переходять у стабільний за цих умов  $C_3SH_2$ .

На швидкість гідратації  $C_3S$  впливають електроліти та органічні добавки. Значно прискорюють гідратацію хлориди, броміди, сульфати, нітрати, хромати лужних і лужноземельних металів. Сповільнюють гідратацію  $Ca(OH)_2$ , а також фториди, фосфати й солі, катіони яких утворюють нерозчинні гідроксиди. Більшість органічних добавок сповільнює гідратацію. Прискорення гідратації при наявності домішок пояснюється зменшенням тривалості індукційного періоду через інтенсивніший процес утворення зародків, сповільнення гідратації викликається гальмуванням процесу

утворення зародків. Введення затравок прискорює гідратацію, але не впливає на міцність  $C_3S$ .

### Гідратація $C_2S$

Двокальцієвий силікат міститься у клінкері в метастабільній  $\beta$ -формі, стабілізованій добавками. Порівняно з  $C_2S$  швидкість гідратації  $\beta$ - $C_2S$  невелика.

*Беліт* гідратується з утворенням таких самих продуктів як і аліт, але в іншому співвідношенні:

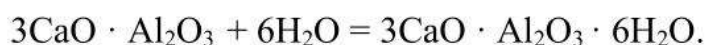


Під час гідратації  $C_2S$  в інтервалі температур 80-120°C утворюються такі самі продукти, що й при кімнатній температурі, в інтервалі 120-180°C –  $C_2SH_2$ , що виникає спочатку і перетворюється на  $C_2SH$  (А), який при тривалій витримці або підвищенні температури переходить у  $C_2SH$  (С).

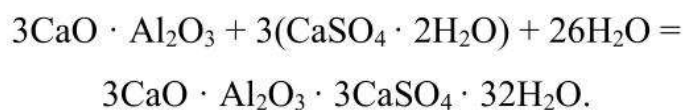
### Гідратація алюмініатів

Гідролічна активність алюмініатів кальцію зумовлена тим, що іони  $Al^{3+}$  у них перебувають у нестійкій для них четвертій координації. Можливість утворення гідроксильних груп у алюмініатів і алюмоферитів виражена більше, ніж у силікатів, що пов'язано з нижчою міцністю зв'язків у тетраедрах  $[AlO_4]^{5-}$  порівняно з тетраедрами  $[SiO_4]^{4-}$ .

*Трикальцієвий алюмініат* гідратується з утворенням гідроалюмінату кальцію:



В разі використання гіпсу (як добавки) при гідратації алюмініату кальцію також можливе утворення *етрингіту*:



### Гідратація цементу

Після замішування цементу з водою спочатку утворюється рихла коагуляційна структура, що володіє тиксотропністю. Під час перемішування тіста контакти, що виникають між гідратними новоутвореннями колоїдних фракцій цементу, руйнуються й тісто зберігає рухливість.

Чим довше триває гідратація, тим більше стає гідратних новоутворень й вище щільність структури. Час, протягом якого утворюється безперервно ущільнююча коагуляційна структура, є періодом тужавіння, тобто формуванням структури. Тужавіння цементу слід розглядати як первинну стадію загального процесу твердіння [5].

Реакції гідратації розпочинаються відразу ж після замішування цементу з водою. Вже через кілька хвилин розчин, що заповнює простір між зернами цементу, стає перенасиченим відносно сульфату й гідроксиду кальцію, що виділяються під час гідролізу аліту. Висока концентрація іонів кальцію та сульфат-іонів утримується в тісті протягом певного часу, що залежить від вмісту в цементі лугів: чим більше в цементі лугів і чим раніше вони починають розчинятися, тим скоріше зменшується перенасичення розчину відносно іонів кальцію.

Крім іонів кальцію й сульфат-іонів у поровому просторі міститься також деяка кількість іонів алюмінію, заліза та кремнію. Концентрація окремих іонів у поровому просторі не залишається сталою, а змінюється із збільшенням ступеня гідратації цементного тіста.

Оскільки основним мінералом портландцементного клінкеру є аліт, то в процесі гідратації цементу, як і при гідратації аліту можна виділити доіндукційний, індукційний та постіндукційний періоди, які виявляються менш чітко, ніж під час гідратації аліту [6].

Період кристалізації, під час якої концентрація іонного розчину не змінюється, називається індукційними (латентним або прихованим). Тривалість періоду індукції можливо змінити фізичним впливом на розчин, наприклад шляхом механічних (вібраційних) коливань, інтенсивного перемішування, а також використання різноманітних силових полів та

випромінювання. Ряд дослідів показав, що фізичний вплив на іонні розчини сприяють виникненню центрів кристалізації, і залежно від ступеню насичення інтенсивність такого впливу має бути різною. Цей процес суттєво залежить також від концентрації розчину, наявності в ньому домішків та інше [7].

На гідратацію як цементу, так і окремих мінералів, великий вплив чинить температура навколишнього середовища. При низьких температурах вона різко гальмується, а при температурах, нижчих за  $-10^{\circ}\text{C}$ , – припиняється. Механізм гідратації практично не змінюється, але значно тривалішим стає індукційний період. При температурах вищих за нормальну, гідратація значно прискорюється, причому гідратація  $\text{C}_2\text{S}$  прискорюється більшою мірою, ніж  $\text{C}_3\text{S}$ .

#### **1.4 Твердіння бетону – складний фізико-хімічний процес**

З хімічної точки зору процес твердіння бетону супроводжується таким фізичним явищем: поступове загустіння цементного тіста й виникнення єдиного конгломерату з гідратованих та негідратованих частинок.

Реакція гідратації починається відразу після замішування цементу з водою і вже через кілька хвилин розчин, що заповнює простір між зернами цементу стає перенасиченим відносно сульфату і гідроксиду, що виділяються під час гідролізу аліту ( $\text{C}_3\text{S}$ ). Оскільки аліт – основний мінерал портландцементу, то процес гідратації проходить у декілька етапів:

✓ *період твердіння* – розчинення мінералів цементу у воді і утворення перенасичених нестійких систем.

До першої групи гідратних новоутворень належать: гідросилікат Са, який утворюється з аліту й беліту.

✓ *колоїдація (тужавлення)* – характеризується новоутвореннями у колоїдальній системі (гель).

До другого періоду відноситься утворення  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  з аліту та беліту. Навколо зерен виникають оболонки з новоутворень, що перешкоджають проникненню води до частинок клінкеру.

У зв'язку з переходом новоутворень у стійку термодинамічну форму відбуваються явища, які супроводжуються зміною сил взаємодії часточок. В середині них розміщуються крупніші кристалічні новоутворення, що створюють каркас цементного каменю, який пронизує основну масу гелеподібного гідросилікату Са.

✓ Далі настає явище *контракції (стягування)*, тобто ущільнення цементного каменя. Кількість вільної води зменшується і настає загустіння цементного тіста й бетонна суміш втрачає рухливість. Цей період називають періодом тужавлення, – третій етап твердіння.

✓ З наростанням механічної міцності за рахунок ущільнення структури та збільшення її кристалічної фази період твердіння супроводжується явищем *кристалізації*. Тобто перетворення колоїдної гелевої фази в кристалічну.

Процес твердіння й гідратації триває довгий час, але із затухаючою інтенсивністю. В кінці настає такий період, коли гідратні оболонки навколо зерен цементу стають щільними й проникнення води до центру цементного зерна призупиняється. Тоді і закінчується наростання міцності цементного тіста в бетоні. В результаті частина зерен цементу в ядрі залишається не прогідратованою водою (30-35% від маси цементу) [8].

### **1.5 Методи управління структуроутворенням в'язучих речовин**

Серед найбільш важливих факторів, визначаючих міцність в'язучих матеріалів, необхідно відмітити такі: мінералогічний склад цементу; В/Ц; тонкість помелу та гранулометрія цементу; вміст тонкомелених мінеральних добавок; вид та кількість водорозчинних хімічних добавок; спосіб і ступінь ущільнення; умови твердіння (температура, вологість, тиск, хімічний склад середовища); тривалість твердіння; ступінь гідратації; стехіометричний склад новоутворень; мікроструктура, текстура цементного каменя та інше [6].

До факторів, що суттєво впливають на інтенсивність твердіння бетону відносять:

- 1) марка цементу;
- 2) початковий вміст води замішування;
- 3) різні види добавок.

Активність цементу (марка) залежить від його мінералогічного складу та тонкості помелу. Для одержання швидкотверднучих бетонів рекомендується застосовувати алітово–алюмінатний цемент з кількістю аліту 50-55%.

З ростом тонкості помелу цементу прискорюється його твердіння. Оптимальним прийнято вважати помел з поверхнею  $4500-5000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Більш тонкий помел потребує більших енерговитрат, а отже й підвищення активності цементу не окупується [9].

Зменшення початкової кількості води у бетонній суміші призводить до прискорення твердіння цементного каменя. Але якщо  $V/C < 0,5$ , то реакція гідратації цементу буде проходити не повністю, що призводить до зниження щільності цементного каменя.

Вважається, що вібрування та теплову обробку бетону слід виконувати в строго зазначений час, який повинен бути узгоджений з кінетикою росту пластичної міцності та тепловиділення. Утворена в кінці першої стадії структуроутворення колоїдна структура – найбільш ефективно управляюча матриця. Вібрування на кінці першої стадії дозволяє підвищити міцність бетону більш ніж на 50% і зменшити проникливість більш ніж в 3 рази.

Технологічні взаємодії на бетонну суміш рекомендується виконувати з урахуванням зміни її електропровідності: наприклад, вібруванню її піддають при максимальній електропровідності. На основі вимірювання електроповерхневого потенціалу масоенергопереносу можливо визначити момент прикладання повторного вібрування і закінчення тепловологісної обробки бетону [10].

Одним із перспективних способів управління процесами структуроутворення цементних композицій є комплексна взаємодія на компоненти бетонної суміші. Запропоновано видаляти повітря із води

замішування та обробляти заповнювач для бетону розчинами солей, змінюючи заряд поверхні.

Більше можливостей отримання структур твердіння із заданими властивостями відкриває хімізація технології бетону. В даний час накопичений великий досвід використання різноманітних добавок для підвищення міцності, морозостійкості, водонепроникнення, корозійної стійкості бетону.

Крім добавок, розроблені й використовуються різноманітні хіміко-технологічні прийоми, що дозволяють інтенсифікувати виробництво залізобетонних виробів і конструкцій. До них відносяться теплова обробка при атмосферному та підвищеному тиску, завчасно паро- й електророзігрів сумішей, нагрів бетону токами СВЧ, електромагнітна обробка води замішування, ультразвукова активація цементу та ін. Найбільш поширене в технології збірного залізобетону із всіх перелічених методів отримали теплова обробка і використання хімічних добавок в бетон [11].

### **1.6 Класифікація добавок для бетону**

Застосування добавок охоплює широкий діапазон сучасного будівництва, починаючи від виготовлення цементних розчинів і закінчуючи складними бетонними спорудами (фундаменти, басейни, злітно-посадочні смуги аеродромів тощо).

Різнманітність добавок дозволяє підвищити морозостійкість бетону, поліпшити перекачування суміші за допомогою насосів, прискорити її твердіння, зменшити усадку, отримати легкий бетон при застосуванні піноутворювачів та багато іншого.

Найбільш поширеними модифікаторами є так звані пластифікатори, дозволяють розріджувати бетонну суміш для зручності подальшої переробки. Можна домогтися такого ж результату додаванням додаткової води, але при цьому губиться щільність, міцність бетону, мають місце усадочні тріщини й тривале висихання конструкції для продовження оздоблювальних робіт.

Застосування пластифікаторів досить універсально: з їх допомогою можна підвищити щільність (водонепроникність) і міцність бетону, зменшивши кількість води (до 30%) в суміші при збереженні її рухливості, знизити кількість води й цементу та одержати бетон з низькою усадкою.

Хімічні добавки класифікують за основним ефектом дії:

1) що регулюють властивості бетонних сумішей: *пластифікуючі добавки* – збільшують рухливість бетонної суміші; *стабілізуючі добавки* – попереджають розшарування бетонної суміші; *водоутримуючі добавки*;

2) добавки, які регулюють тужавлення бетонних сумішей і твердіння бетону: добавки, що прискорюють або зменшують швидкість твердіння; що забезпечують твердіння при негативних температурах (протиморозні);

3) що регулюють щільність і пористість бетонної суміші та бетону: газоутворюючі, піноутворюючі, ущільнювальні;

4) добавки – регулятори деформацій бетону;

5) що підвищують захисні властивості бетону сталі, інгібітори корозії сталі;

6) добавки – стабілізатори, що підвищують стійкість бетонних сумішей проти розшарування;

7) добавки, які надають бетону спеціальні властивості: гідрофобізаційні добавки – зменшують змочування бетону; антикорозійні добавки – підвищують стійкість в агресивних середовищах; фарбувальні – підвищують бактерицидні та інсектицидні властивості; електроізоляційні; протирадіаційні [12].

Діючі нормативи (ДСТУ Б В.2.7-65-97 Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Класифікація [13] та ДСТУ Б.В.2.7 171:2008 Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови [14]) класифікують добавки за призначенням:

1) *добавки, які регулюють властивості бетонних і розчинних сумішей:*

а) пластифікуючі (I група суперпластифікатори, II група сильнопластифікуючі, III група середньопластифікуючі, IV група слабопластифікуючі, табл. 1.1);

б) стабілізуючі;

в) водоутримуючі;

г) такі, що поліпшують перекачування;

д) такі, що регулюють зберігання бетонних сумішей;

е) такі, що сповільнюють тужавлення;

ж) такі, що прискорюють тужавлення (табл. 1.1);

и) поризуючі (для легких бетонів повітровтягувальні, піноутворюючі, газоутворюючі, табл. 1.2);

*2) добавки, які регулюють тверднення бетонів і розчинів:*

а) такі, що сповільнюють тверднення;

б) такі, що прискорюють тверднення (табл. 1.2);

*3) добавки, які підвищують міцність і (або) корозійну стійкість, морозостійкість бетону і залізобетону та знижують проникність бетону:*

а) водоредукуючі (I, II, III, IV групи, (табл. 1.1));

б) кольматуючі;

в) газоутворюючі;

г) повітровтягувальні (табл. 1.2);

д) такі, що підвищують захисні властивості бетону за відношенням до сталеві арматури (інгібітори корозії сталі) (табл. 1.1);

*4) добавки, які надають бетонам і розчинам спеціальні властивості:*

а) протиморозні (забезпечують тверднення при мінусових температурах, (табл. 1.2));

б) гідрофобізуючі (I, II і III групи, (табл. 1.1)).

В.Б. Ратінов [2] за механізмом дії добавок розподіляє їх на 4 класи (з групами):

1) речовини, що змінюють розчинність мінеральної в'язучої речовини і не вступають з нею в хімічну реакцію:

- 1.1 електроліти, що містять однакові з в'язучою речовиною іони;
- 1.2 електроліти, що не містять однакові з в'язучою речовиною іони;
- 1.3 неелектроліти;
- 2) речовини, що реагують з мінеральною в'язучою речовиною з утворенням комплексних сполук важкорозчинних або таких, що мало дисоціюють (табл. 1.2):
- 2.1 електроліти, що беруть участь у реакціях приєднання з утворенням:
- подвійної солі типу  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaX}_2 \cdot (10 \div 12) \cdot \text{H}_2\text{O}$ , де X однозарядний аніон ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  і т.д.) або  $\frac{1}{2}$  двозарядного аніона ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ );
  - гідроксисолі, наприклад гідроксихлориди  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ , де  $m = 1$  або  $12$ ; гідроксинітрати  $\text{CaO} \cdot \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ , де  $m = 0,53$ ; гідроксинітрит  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Ca}(\text{NO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 2.2 електроліти, що беруть участь у реакціях заміщення;
- 3) готові центри кристалізації “затравки” – неорганічні мікродисперсні продукти гідратації в'язучої речовини або споріднені речовини: для гіпсу (півгідрату)  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  – двогідрат  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , для портландцементу – гідросилікати кальцію, мікрокремнезем, метакаолін;
- 4) органічні поверхнево-активні речовини (ПАР), що адсорбуються на поверхні твердої фази (табл. 1.1):
- 4.1 такі, що гідрофілізують пластифікуючі добавки: лігносульфонати, сульфомеламінформальдегіди, сульфонафталінформальдегіди, полікарбоксилати, поліакрилати;
- 4.2 такі, що гідрофобізують гідрофобізуючі, повітровтягувальні добавки: етилсиліконат, метилсиліконат, алюмометилсиліконат, абіетат натрію, фенілетоксисилоксан, полігідросилоксани, деревний пек.

Таблиця 1.1

Розповсюджені добавки ПАР: пластифікатори, гідрофобізуючі,  
повітровтягувальні

Вид добавки за хімічним складом (структурна формула). Тип добавки за ефективністю (водоредуруючий ефект, %)	Марки добавок (фірма, країна-виробник)	Призначення					Клас за В.Б. Рагнівим
		пластифікатори	гідрофобизуючі	повтроутягувальні	газотворювальні		
Лігносульфонати (рис.1, а). Від слабо- до сильно-пластифікуючих (5÷15 %)	ЛСТ, ЛТМ, ЛСТМ-2 (Росія)	+					4.1
	Універсал-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, г). 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
Еписиліконат натрію (рис.2, а)	ГКЖ-10	+	+	+			4.2
Метилсиліконат натрію (рис.2, б)	ГКЖ-11	+	+	+			4.2
Метилсиліконат калію (рис.2, в)	ГКЖ-11К (ДП «Кремнійполімер», м. Запоріжжя)	+	+	+			4.2
Алюмометилсиліконат натрію	АМСР-2		+				4.2
Фенілетоксисилоксан	113-63 (ФЭС-50)		+				4.2
	136-41 (ГКЖ-94)		+		+		4.2
	136-157М (ГКЖ-94М) (ДП «Кремнійполімер, м. Запоріжжя)		+		+		4.2
	Силол (НПП «Крок», м. Дніпропетровськ)		+				4.2
Абітат натрію (рис.2, г)	СНВ (Росія); СДО (м. Свалява)			+			4.2
Деревний пек	КТП; ОТП			+			4.2

Таблиця 1.2

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 <sub>1</sub>	+				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
Тринатрійфосфат	$Na_3PO_4$	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-прискорювачі твердіння бетону

В теперішній час існує безліч робіт з питань вивчення впливу неорганічних добавок на властивості цементу. Введенням тих чи інших солей регулюють найважливіші технічні властивості, особливо це стосується комплексних добавок.

Одні й ті ж добавки залежно від їх кількості і мінералогічного складу цементу діють по різному.

Водорозчинні солі, що використовують у якості добавок до цементів, можуть суттєво змінювати структуру й об'єм пор цементного каменю і впливати тим самим на його технічні властивості. Так, добавка  $NaNO_2$  знижує

сумарну пористість затверділого  $C_3S$  при одночасному перерозподілі об'ємів пор в цементному камені у бік зменшення їх розміру. Природно, що такий камінь буде володіти кращими технічними властивостями [2].

Використовуючи хімічні добавки, можна спрямовано впливати на процес гідратації цементів, підсилювати гідратацію найбільш структурно-активних фаз клінкеру і, навпаки, подавляти гідратацію тих мінералів клінкеру, які негативно впливають на міцність й довговічність цементного каменю.

Одна й та ж добавка, залежно від її дозування, може підсилювати гідратацію різних клінкерних фаз. Наприклад, нітрит натрію у кількості до 5% ініціює гідратацію  $C_3S$ , а при більш високих концентраціях –  $C_3A$ .

Відносна зміна ступеню гідратації  $C_3S$  і  $C_3A$  може бути і при насиченні рідкої фази оксидами, що входять у склад самого цементу. Якщо ступінь гідратації  $C_3S$  у воді 26,5%, у розчині гіпсу – 54,0%, то у розчині  $Ca(OH)_2$  – 49,5%.

Хлориди, головним чином  $CaCl_2$ , прискорюють тужавлення й твердіння цементу, підвищують його марочність, збільшують тепловиділення окремих мінералів і цементу в цілому, підвищують морозостійкість. Хлорид кальцію покращує процес синтезу гідросульфоалюмінату кальцію.  $AlCl_3$ ,  $FeCl_3$  і деякі інші утворюють колоїдні гідроксиди, а в подальшому і кальцієві солі, наприклад, гідроферити кальцію, знижують проникність цементного каменю. Хлорид цинку уповільнює процеси тужавлення й твердіння цементу в перші строки, але покращує структуроутворення цементного каменя, збільшуючи його міцність в пізні терміни твердіння [15].

Хлориди за ефективністю дії до 28 діб твердіння можна розташувати у наступний ряд:  $FeCl_3 \rightarrow MgCl_2 \rightarrow ZnCl_2 \rightarrow AlCl_3 \rightarrow CaCl_2 \rightarrow BaCl_2 \rightarrow KCl \rightarrow$  еталон.

Поступове зменшення різниці механічної міцності зразків, одержаних із додаванням  $CaCl_2$  і без нього, свідчать про те, що дія добавки виявляється переважно на ранніх стадіях процесу, тому що на більш пізніх етапах велика кількість гелю буде перешкоджати дифузії води. З цього слідує, що на пізніх

стадіях процес гідратації  $C_3S$  без добавки хлориду кальцію проходить більш інтенсивно, ніж у її присутності [16].

Хлориди мають ряд недоліків: збільшують усадочні явища й сприяють корозії арматури в бетоні. Навпаки, нітрати інтенсифікують процеси твердіння, утворюють більш щільні структури цементного каменю, зменшують усадку і не викликають корозію арматури. Але  $NaNO_3$  і  $KNO_3$  погіршують характеристики міцності, їх слід використовувати в комплексі з іншими неорганічними солями або разом із вапняним молоком [15].

Розчинні сульфати в окремих випадках позитивно впливають на процеси твердіння, тому що збільшують розчинність клінкерних мінералів і сприяють синтезу гідросульфоалюмінатів кальцію.

Розчинні карбонати сприяють синтезу  $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot nH_2O$  із деяким уповільненням процесу гідратації  $C_3A$  і підвищенням кінцевої міцності цементного каменю.

При нормальній і зниженій температурах добавка  $NaNO_2$  по різному впливає на гідратацію усіх чотирьох клінкерних мінералів, скорочує тривалість індукційного періоду гідратації  $C_3S$  [17].

При  $20^\circ C$   $NaNO_2$  у кількості 2% скорочує індукційний період з 7 год. до 20 хв. Дія нітриту натрію на кінетику гідратації  $C_3S$  в ранні терміни подібна впливу тепловологісної обробки, яка прискорює гідратацію  $C_3S$  тільки після утворення зародків гідросилікатів, для чого незалежно від температури потрібно 15-20 хв. Добавка  $NaNO_2$  знижує основність гідросилікатної фази, сприяє утворенню гідросилікатного гелю із підвищеною стійкістю до процесів старіння й позитивно впливає на формування структури пор у  $C_3S$ , що твердіє. Але негативно впливає на міцність  $C_2S$ , яка знижується в 1,6 рази порівняно з бездобавочним білітом.

Механізм дії  $NaNO_2$  полягає в зміні складу і властивостей рідкої фази в цементі, що гідратується, що у свою чергу, викликає зміну швидкості гідратації, властивостей і складу гідратних фаз, які обумовлюють багато властивостей цементного каменю.

В останній час з'явилася тенденція до розробки й використання комплексних добавок в бетон, які відрізняються поліфункціональністю своєї дії. Одночасно вони впливають на декілька характеристик бетону: терміни тужавіння, рухливість, темп росту міцності, тепловиділення, усадку, корозійну стійкість, морозостійкість та ін.

Застосування комплексних добавок викликане необхідністю посилити ефект, досягнутий при введенні однокомпонентної добавки (приріст міцності), або усунути її шкідливу побічну дію (корозія арматури, усадка та ін.) [8].

Введення комплексу солей  $\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2$  дозволяє практично повністю виключити корозію арматури, викликану агресивними іонами хлору, і підвищити ефект збільшення міцності, досягнутий введенням хлориду кальцію.

Використання добавки  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (0,8-1,2%) + СДБ (0,15-0,2%) дозволяє знизити витрати цементу на 8-10%. Економити цемент і зменшувати цикл пропарювання дозволяє також добавка СДБ +  $\text{NaOH}$ . Розроблені луговмісні добавки на основі  $\text{NaOH}$  і СДБ, що дозволяють знизити витрати цементу і зменшити цикл тепловологісної обробки.

Г.С. Рояк запропонував комплексну добавку, що складається із хлориду кальцію і сульфату натрію, яка призводить при певних умовах до більш інтенсивного твердіння, ніж кожна із цих добавок окремо. Оптимальне дозування добавки встановлюють зазвичай дослідним шляхом [5].

Добавка  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  при збільшенні міцності відразу після пропарювання переважала більшість солей. Необхідно враховувати також, що сульфат натрію недорогий та доступний продукт. Сульфати підвищують розчинність клінкерних мінералів портландцементу по кремнезему, а хлориди збільшують розчинність по вапну. При сумісному введенні вказаних солей слід чекати підвищення ступеня конгруентності розчинності цементу, завдяки чому більш повно будуть використані його в'язучі властивості.

Досліджувались також комплекси солей сульфату натрію з хлоридами натрію, калію, амонію, магнію, які не утворюють нерозчинних сполук з сульфатами і дозволяють сумісну підготовку компонентів добавки. Оскільки іони хлору є агресивними по відношенню до сталевий арматури, додатково розв'язувалась задача по розробці комплексних добавок на основі сульфату натрію з компонентами, які не визивають корозію сталі.

Застосовувались нітрати натрію, калію, амонію та тіосульфат натрію. Вибір додаткових компонентів був обумовлений результатами, отриманими при дослідженні однокомпонентних добавок, а також технологічністю, вартістю і доступністю солей.

Добавки електролітів вибірково впливають на активність клінкерних мінералів цементу. В результаті змінюється основність гідросилікатів, утворюється гідроксид кальцію різного ступеню кристалізації, який в процесі твердіння зазнає структурних змін. На стабільність складу продуктів новоутворень впливає склад введеної добавки. Підвищена міцність цементного каменю з добавкою  $KCl+Na_2SO_4$  пов'язана не зі збільшенням ступеня гідратації в'язучого, а зі зміною фазового складу продуктів гідратації та гідросилікатів.

На характер структуроутворення цементно-водної дисперсії і на властивості затверділого матеріалу суттєвий вплив мають кінетичні характеристики рідини замішування. Спрямована зміна властивості води, хімічного та структурно-утворюваних компонентів являється одним із шляхів підвищення в'язучих властивостей цементу [6].

Оптимальні добавки електролітів надають системі цемент – вода складний фізико-хімічний вплив, в результаті якого модифікуються процеси гідрато- та структуроутворення.

Введення комплексної добавки  $KCl+Na_2SO_4$  змінює кінетику структуроутворення цементної дисперсії по співвідношенню з бездобавочним складом, так як компоненти добавки являються прискорювачами твердіння цементу. Проте у ранні терміни ріст пластичної міцності цементної пасти при

введенні добавки уповільнюється у порівнянні з еталоном. Таке явище кривих залежить від впливу розчинних іонів на структуру води замішування рідкої фази. Негативно гідратовані іони  $K^{1+}$  та  $Cl^{1-}$  змінюють кінетичні характеристики води: збільшується дифузія й рухливість іонів, знижується в'язкість.

Переважаюча кількість хімічних добавок, таких як  $CaCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $K_2SO_4$ ,  $K_2CO_3$ ,  $Ca(NO_3)_2$  та інші, викликає стиснення дифузійного шару іонів. Це послаблюється дією сил відштовхування та сприяє більш активному прояву сил тяжіння між частинками твердої фази як в початковій, так і в затверділій стадії формування коагуляційної структури цементного гелю. Крім того, деякі електроліти прискорюють закінчення індукційного періоду, тобто тужавіння, підвищуючи міцність цементного каменю [18].

### **1.8. Процеси структуроутворення у присутності комплексних добавок**

Механізм дії добавок може бути різним. При введенні неорганічних солей виникають важкорозчинні сполуки за рахунок взаємодії вапна та добавок, це сприяє додатковому гідролізу клінкерних мінералів і, як наслідок, збільшенню об'єму твердої фази. Окремі добавки підвищують розчинність вапна і також прискорюють гідратацію клінкерних мінералів. Є відомості, що добавки здійснюють каталітичну дію за рахунок утворення проміжних сполук.

Розглядаючи процес твердіння портландцементу у присутності добавок, необхідно враховувати не тільки його мінералогічний склад, але й етап твердіння, вид добавки та її кількість. У цьому зв'язку на різному етапі твердіння може бути й різний механізм дії добавки. У першу мить, коли має місце переважно розчинний механізм гідратації, відбувається прискорення процесу гідратації і гідролізу вихідних матеріалів. Інтенсифікація цього процесу відбувається і на наступних етапах, але в меншій мірі. Збільшення концентрації солі зверх оптимальної не дає позитивного впливу, а тільки погіршує результати. Причина полягає в тому, що малі концентрації

неорганічних солей сприяють розриву водневих зв'язків води, переорієнтації окремих її групувань із заміщенням молекул  $H_2O$  іонами солі. З ростом концентрації розчину ступінь такого заміщення зростає із виникненням нової упорядкованості гідратованих іонів. Тому розчин електроліту поступово приймає будову самої солі і його активність зменшується.

Стійка система, що складається із відносно крупних цементних частинок, осідають повільно, і утворений осад має достатньо щільну структуру, так як частинки твердої фази, що осаджуються не злипаються й вільно скочуються. Коагулятивна система осідає швидше й утворений осад не має такої щільної структури, оскільки частинки при осадженні злипаються в будь-якому розташуванні. Таким чином, в процесі самоущільнення цементного гелю при рівних початкових концентраціях твердої фази коагуляційна структура може бути невпорядкованою через велику кількість випадкових факторів, що впливають на її формування. Для того щоб перетворити коагуляцію в направлений процес шляхом збільшення активності сил внутрішньої взаємодії (тяжіння) між частинками різноманітної крупності, необхідно застосовувати високоякісне вібрування, сприяюче не тільки компактному просторовому розміщенню частинок твердої фази, але й інтенсифікації іонного обміну на стадії зародження мікрокоагуляційної структури цементного гелю.

На підтвердження вище наведеному можна привести результати досліджень. Із них слідує, що із збільшенням вмісту  $CaCl_2$  в межах 0,5-5% маси цементу часу, на протязі якого по приладу Віка фіксується початок і кінець тужавіння, значно скорочується. Прискорена дія  $CaCl_2$  відчувається тим більше, чим більше його міститься у цементному гелі і менше в ньому води. При 5%  $CaCl_2$  початок тужавлення цементного гелю настає через 10 хвилин, а кінець тужавіння співпадає з цим же часом, тобто він відсутній. По мірі збільшення вмісту води в цементному гелі з добавкою  $CaCl_2$  тужавіння уповільнюється і між початком та кінцем є інтервал часу .

Відомо, що до тих пір, поки майже весь гіпс не зв'яжеться у гідросульфоалюмінат кальцію  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  та інші добавки майже не вступають у взаємодію із фазами, що містять алюміній. Однак вони підвищують іонну силу розчину, у зв'язку з цим швидше утворюється гідросульфоалюмінат кальцію. Тому скоріше настає стан перенасичення, раніше закінчується індукційний період і починається ближня коагуляція цементного гелю. Природньо, що в таких умовах прискорюється процес утворення кристалогідратних комплексів (центрів кристалізації) й швидше на ранній стадії процесу зміцнюється мікроструктура цементного гелю, тобто він перетворюється в каменеподібне тіло.

Виходячи з цього, процес насичення іонами рідкого середовища цементного гелю, по деякій аналогії із встановленими термінами “початок і кінець тужавлення”, може бути умовно охарактеризованим початком і кінцем індукційного періоду.

Кінетика структуроутворення цементного гелю характеризується зворотніми й незворотніми процесами, залежними від властивостей зв'язків між кристалогідратними комплексами.

Через недосконалості коагуляційного структуроутворення цементного гелю при спонтанному протіканні процесу в подальшому не повністю реалізуються потенційні властивості кристалізаційної структури цементного каменю. Якщо під час індукційного періоду тиксотропно зруйнувати сили зв'язку в цементному гелі, то при їх відновленні утворюються умови для активізації сил взаємодії між частинками твердої фази й зміцненням мікроструктури цементного каменю, тому підвищується щільність коагуляційної структури і в результаті цього міцність цементного каменю [18].

### **1.9 Вплив центрів кристалізації на процеси твердіння цементу**

Велику роль в твердінні цементу відіграють мінеральні “затравки” – центри кристалізації.

Процес твердіння можна підвищити введенням невеликої кількості тонкомеленого затверділого цементу [19]. Можливо, часточки затверділого

цементу діють як центри кристалізації, тому в тісті спрощується виникнення гідратних фаз і прискорюється гідратація. Але більш ефективнішими є добавки, що слугують одночасно і затравкою, і реагентом для синтезу гелю й фази, що розширюється, зануреної в цей гель. Такі добавки містять, як правило, сульфати й алюмінати. Затравки вводять у цемент в кількості 10%. Вони підвищують міцність із 0,5 до 14,0-18,5 МПа через 10 годин твердіння, із 60,0 до 70,0-80,0 МПа через 28 діб. Особливістю таких цементів є скорочені терміни тужавіння (початок тужавіння настає через 20-45 хв).

Механізм дії оптимальних мінеральних добавок розглянутий на прикладі глинистих мінералів. Дані ДТА і термогравиметрії цементних зразків показують, що введення оптимальних добавок глинистих мінералів призводить до збільшення кількості гелеподібних, а також більш окристалізованих гіросилікатів.

У всіх процесах гідратації й структуровиникнення велику роль відіграє структура води замішування. Введення оптимальних мікродобавок мінеральних частинок призводить до розпорядкування структури води замішування, до збільшення кількості вільних молекул, внаслідок чого підвищується її фізико-хімічна й структуроутворююча активність в дисперсній системі.

### **1.10 Висновки літературного огляду**

Спираючись на зібрану інформацію, робимо такі висновки:

1. Основними напрямками технічного прогресу в технології бетонних робіт є: прискорення твердіння бетону, зменшення витрат цементу, зниження енерговитрат, підвищення довговічності конструкцій. Одним із шляхів розв'язання цих задач є використання добавок в бетон.

2. Застосування добавок є найбільш ефективним способом, що підвищує якість бетонів та не вимагає великих капітальних затрат. Грамотне застосування цільових комплексних добавок дозволяє вирішити будь-які проблеми, пов'язані з отриманням бетонів із заданими властивостями.

Як правило, вони двокомпонентні. Завдяки певним комбінаціям бетонні заводи отримують високоміцні бетони з унікальними характеристиками. Адже, одні й ті ж добавки залежно від їх кількості і мінералогічного складу цементу діють по різному.

3. Процес твердіння цементу можна підвищити введенням невеликої кількості мінеральної “затравки” – високодисперсних речовин.

Затравки підвищують міцність із 0,5 до 14,0-18,5 МПа через 10 годин твердіння, із 60,0 до 70,0-80,0 МПа через 28 діб. Можливо, часточки тонкомеленого цементу діють як центри кристалізації, тому в тісті спрощується виникнення гідратних фаз і прискорюється гідратація.

4. Хлориди, нітрати, нітроти, розчинні сульфати і карбонати широко використовуються, мають позитивний ефект, але їх дія залежить від концентрації добавок, мінерального складу цементу, періоду твердіння цементу. Найбільш відомий – хлорид кальцію. Сприяє збільшенню міцності в усі терміни твердіння, але хлорид-іони агресивні відносно арматури залізобетону. Нітрати є інгібіторами корозії арматури однак зменшують швидкість гідратації двокальцієвого силікату.

5. Щоб збільшити швидкість твердіння цементу необхідно підвищити розчинність клінкерних мінералів по кремнезему і по вапну, а такий характер розчинності забезпечує комплексна добавка із сульфатів і хлоридів.

Введення комплексу солей хлориду кальцію і нітриту натрію дозволяє практично повністю виключити корозію арматури й підвищити ефект збільшення міцності, досягнутий введенням хлориду кальцію. Тому може бути доцільним використанням комплексної добавки із хлориду кальцію, сульфату натрію і нітриту натрію.

## **РОЗДІЛ 2. МЕТА РОБОТИ**

1. Підібрати раціональний склад комплексної хімічної добавки з використанням:  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , гідратованого цементу.

2. 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.

3. Дослідження динаміки зміни міцності зразків залежно від змінних факторів експерименту.

4. Провести аналіз впливу добавок на тепловиділення при твердінні цементу.

## **РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **3.1 Планування експерименту**

Планування експерименту – це комплексна процедура вибору числа дослідів й умов їх проведення, необхідних та достатніх для розв’язання поставленої задачі з необхідною точністю.

Планування експерименту починається з постановки задачі та вибору об'єкта дослідження. Об'єктом дослідження називають об'єкт, який є носієм деяких властивостей і якостей, що підлягають вивченню згідно із задачею експерименту.

Рекомендується застосовувати активні експерименти, тобто ті, якими можна керувати. В цьому випадку параметрам об'єкта чи факторам задаються деякі визначені значення та підтримуються під час досліду сталими. Контрольні змінні (фактори) позначають буквою «X». Вихідні показники експерименту позначають буквою «Y» і називають відгуком об'єкта дослідження на дію факторів «X».

Математична модель об'єкта дослідження – це система рівнянь, яка відображає зміст, структуру та кількісні зв'язки, що характеризують об'єкт дослідження. В теорії планування експерименту застосовують регресивні математичні моделі у вигляді:  $Y = \varphi(x, \theta)$ , де  $\theta$  – вектор параметрів моделі. Для одержання лінійних регресивних моделей використовують плани першого порядку:  $y(x, b) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j + \dots + b_nx_n$ . У цьому рівнянні визначенню підлягають коефіцієнти регресії «b».

Планування експериментів та вибір складу цементу з використанням математично-статистичних методів рекомендується проводити при використанні складу цементу з вмістом різних хімічних добавок; при побудові залежностей, необхідних для коригування складу у процесі його виготовлення, а також у випадку використання автоматичних систем керування технологічним процесом.

Планування дослідів і вибір складу цементу з використанням математично-статистичних методів заключається у виборі математичної залежності між заданими властивостями цементу, витратою використовуваних матеріалів. Отримана математична залежність використовується для пошуку та призначення оптимальних складів.

При проведенні дослідів у залежності від умов задачі усі фактори варіюються або на трьох рівнях: середньому (головному), нижньому та

верхньому, відстаючих від головного на однакову величину, яка має назву інтервал варіювання, або на двох рівнях – верхньому та нижньому.

Існує декілька різновидів планів першого порядку: однофакторний (класичний) експеримент; повний факторний експеримент; дробний факторний експеримент.

В нашому випадку було проведено трьохфакторний експеримент. Матриця планування експерименту наведена в таблиці 3.1.

Експеримент, у якому реалізуються всі можливі поєднання рівнів факторів, називається повним факторним експериментом – ПФЕ, кількість дослідів у якому:  $N=K^n$ , де  $N$  – кількість дослідів;  $K$  – кількість рівнів;  $n$  – кількість факторів.

Для спрощення записів та послідуючих розрахунків верхній рівень факторів позначається символом (+ 1), середній (0), а нижній (- 1).

Часто при записі плану проведення експерименту цифру 1 не вказують і кодовий запис рівнів факторів має вигляд відповідно: “ + ”, “ 0 ”, “-”.

Використані хімічні добавки: хлорид кальцію ( $CaCl_2$ ) – 0,5%; нітрит натрію ( $NaNO_2$ ) – 0,5%; сульфат натрію ( $Na_2SO_4$ ) – 0,5%, вміст яких постійний в усіх дослідях.

#### Планування експерименту

Змінні фактори:

$X_1$  – вміст СРН, %: 1,5; 3,0; 4,5;

$X_2$  – тривалість помелу СРН, год: 2; 4; 6;

$X_3$  – ступінь нейтралізації СРН, %: 30; 60; 90.

Таблиця 3.1

#### Матриця планування експерименту

№ дослідів	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

### 3.2 Приготування розчинів добавок

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. Αρσιος – 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, проградуйована при певній температурі в г/см<sup>3</sup> або в градусах Боме (°Be).

Вміст твердої речовини знаходився за табличними даними стосовно кожного виду добавки [20]. Витрати матеріалів для проведення експерименту наведені в таблиці 3.2.

В процесі розрахунків користувались наступними даними:

$\text{CaCl}_2 \quad \rho_m=1,17 \text{ г/см}^3; \quad C=234 \text{ г/л};$

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \quad \rho_m=1,12 \text{ г/см}^3; \quad C=145,5 \text{ г/л};$

$\text{NaNO}_2 \quad \rho_m=1,13 \text{ г/см}^3; \quad C=226 \text{ г/л}.$

### 3.3 Розрахунок кількості хімічних добавок і води

Кількість води замішування визначаємо з урахуванням вмісту води в розчинах хімічних добавок і СРН:

$$V_{\text{води}} = V_{\text{р-ну}} \cdot \rho_n - m_g,$$

де  $V_{\text{води}}$  – об'єм води,  $\text{см}^3$  (мл);

$V_{\text{р-ну}}$  – об'єм розчину,  $\text{см}^3$  (мл);

$\rho_n$  – густина розчину добавки,  $\text{г/см}^3$ ;

$m_g$  – маса добавки, в перерахунку на суху речовину, г.

#### 1) $\text{CaCl}_2$

Вміст  $\text{CaCl}_2$  0,5% від маси цементу (350 г), тобто 1,75 г.

Якщо:

234 г/л – 1000 мл

1,75 г – x;

$$\text{то } x = \frac{1,75 \cdot 1000}{234} = 7,5 \text{ мл (8 мл)}.$$

Отже, необхідно 8 мл розчину  $\text{CaCl}_2$ .

Визначаємо масу розчину:  $m = V \cdot \rho_m = 8 \cdot 1,17 \text{ г/см}^3 = 9,36 \text{ г}.$

Кількість  $\text{CaCl}_2$ : 0,5% – 1,75 г.

Кількість води:  $V_{\text{води}} = 9,36 - 1,75 = 7,61 \text{ мл}.$

#### 2) $\text{NaNO}_2$

Вміст  $\text{NaNO}_2$  0,5% від маси цементу (350 г), тобто 1,75 г.

Якщо:

226 г/л – 1000 мл

1,75 г – x;

$$\text{то } x = \frac{1,75 \cdot 1000}{226} = 7,7 \text{ мл (8 мл)}.$$

Отже, необхідно 8 мл розчину  $\text{NaNO}_2$ .

Визначаємо масу розчину:  $m = V \cdot \rho_m = 8 \cdot 1,13 \text{ г/см}^3 = 9,04 \text{ г}$ .

Кількість  $\text{NaNO}_2$ : 0,5% – 1,75 г.

Кількість води:  $V_{\text{води}} = 9,04 - 1,75 = 7,29 \text{ мл}$ .

### 3) $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Вміст  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,5% від маси цементу (350 г), тобто 1,75 г.

Якщо:

145,5 г/л – 1000 мл

1,75 г – x;

$$\text{то } x = \frac{1,75 \cdot 1000}{145,5} = 12,0 \text{ мл}.$$

Отже, необхідно 12 мл розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Визначаємо масу розчину:  $m = V \cdot \rho_m = 12 \cdot 1,12 \text{ г/см}^3 = 13,44 \text{ г}$ .

Кількість  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ : 0,5% – 1,75 г.

Кількість води:  $V_{\text{води}} = 13,44 - 1,75 = 11,69 \text{ мл}$ .

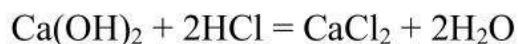
### 4) $\text{HCl}$

Для визначення кількості соляної кислоти для нейтралізації гідроксиду кальцію у мінеральній добавці спочатку визначався загальний вміст  $\text{Ca(OH)}_2$  методом об'ємного титрування.

*Тривалість помелу СРН – 2 год*

Для наважки СРН 21 г (6,78 г сухої речовини) витрачено 15,1 мл розчину соляної кислоти (1,04 г  $\text{HCl}$ ).

За стехіометричним рівнянням:



вміст  $\text{Ca(OH)}_2$  складає 1,05 г, або 15,5%.

$M(\text{Ca(OH)}_2) = 74 \text{ г/моль}$ ,  $M(\text{HCl}) = 73 \text{ г/моль}$ .

Для наважки СРН 5,25 г (1,5% від маси цементу) витрати кислоти повинні складати для часткової нейтралізації, відповідно: 30% – 3,5 мл; 60% – 7 мл; 90% – 10,5 мл.

*Тривалість помелу СРН – 4 год*

Для наважки СРН 14,2 г (5,4 г сухої речовини) витрачено 14,6 мл розчину соляної кислоти (1,01 г HCl).

Вміст Ca(OH)<sub>2</sub> складає 1,02 г, або 18,8%.

Для наважки СРН 10,5 г (3% від маси цементу) витрати кислоти повинні складати для часткової нейтралізації, відповідно: 30% – 7 мл; 60 % – 14 мл; 90% – 21 мл.

*Тривалість помелу СРН – 6 год*

Для наважки СРН 23,5 г (10,72 г сухої речовини) витрачено 18,5 мл розчину соляної кислоти (1,28 г HCl).

Вміст Ca(OH)<sub>2</sub> складає 1,30 г, або 12,1%.

Для наважки СРН 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 СРН**

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

*Тривалість помелу СРН – 2 год, 4 год, 6 год:*

1,5% – 16,25 г СРН      1,5% – 13,7 г      1,5% – 13,7 г

3% – 32,5 г СРН      3% – 27,4 г      3% - 27,4 г

4,5% – 48,75 г СРН      4,5% – 41,1 г      4,5% - 41,1 г.

Вміст води в суспензії СРН 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 СРН при помелі на протязі 2 год становить 67,7%; 4 год – 38,5%, 6 год – 38,3%. Вологість СРН встановлювалась дослідним шляхом.

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

Загальні витрати матеріалів для проведення експерименту наведено в таблиці 3.2.

### **3.4 Визначення нормальної густоти цементного тіста**

Нормальна густота цементного тіста визначались за стандартною методикою, що викладена в ДСТУ Б.В.2.7-185:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму [21].

#### **Суть методу**

Нормальну густоту визначають вимірюванням відстані занурення стандартного товкачика в цементне тісто певної консистенції. Консистенцію цементного тіста змінюють шляхом змінення кількості води при його приготуванні.

#### **Відбір та підготовка проб**

Пробу цементу для випробувань відбирають згідно з ДСТУ Б В.2.7-44-96 Будівельні матеріали. Цементи. Відбір і підготовка проб [22].

Підготовку проби цементу для випробувань виконують згідно з розділом 5 ДСТУ Б В.2.7-187:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск [23].

#### **Устаткування та матеріали**

1. Прилад Віка з металевим товкачиком.
2. Кільце до приладу Віка.
3. Мішалка.
4. Ваги лабораторні згідно з ГОСТ 24104-88 Весы лабораторные общего назначения и образцовые. Общие технические условия (Ваги лабораторні загального призначення та зразкові. Загальні технічні умови) з похибкою зважування не більше ніж 0,1 г [24].

5. Вода згідно з ГОСТ 2874-82 Вода питьєвая. Гигиенические требования и контроль за качеством (Вода питна. Гігієнічні вимоги та контроль за якістю) [25] або ДСТУ ISO 3696:2003 Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння (ISO 3696:1987, IDT) [26].

#### Опрацювання і наведення результатів випробувань

Нормальна густина цементного тіста виражають у відсотках маси води від маси цементу і визначають з точністю до 0,25 %.

### **3.5 Визначення термінів тужавлення**

Терміни тужавлення цементу визначались за стандартною методикою, що викладена в ДСТУ Б.В.2.7-185:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму [21].

#### Суть методу

Строки тужавлення цементу визначають вимірюванням проміжків часу, за який стандартна голка проникає на визначену глибину в цементне тісто нормальної густоти.

#### Устаткування та матеріали

1. Прилад Віка зі сталєвою голкою.
2. Кільце до приладу Віка.
3. Мішалка.
4. Ваги лабораторні згідно з ГОСТ 24104-88 [24].
5. Вода згідно з ГОСТ 2874-82 2003 [26] або ДСТУ ISO 3696:2003 [26].

#### Опрацювання і наведення результатів випробувань

Початком строку тужавлення цементного тіста нормальної густоти визначають строк, який минув від початку замішування тіста до того часу, коли голка при зануренні в тісто не доходить до пластинки на відстань від 2 мм до 4 мм.

Кінцем строку тужавлення цементного тіста нормальної густоти вважають строк від початку замішування тіста до часу, коли голка занурюється у тісто не більше ніж на відстань від 1 мм до 2 мм.

Строки тужавлення наводяться у звіті про випробування з округленням до 10 хв.

### **3.6 Визначення характеристик міцності**

#### **Визначення міцності цементу на стиск**

##### **Суть методу**

Метод включає визначення міцності на стиск зразків-кубиків розмірами 30x30x30 мм.

Ці зразки виготовлялись із чистого цементного тіста при нормальній густоті 25,4%, ущільнювались на струшуючому столику (30 струшувань). Зразки витримувались у формі для зразків-кубиків, тверділи у приміщенні при температурі 16-20°C.

Після закінчення терміну зберігання (1 доба, 2 доби, 7 діб, 28 діб) зразки випробовують на міцність при стиску. Характеристики міцності визначались на пресі ГМС-50.

##### **Загальні умови відбору та підготовки проб**

Пробу цементу для випробувань необхідно відбирати згідно з ДСТУ Б В.2.7-44-96 Будівельні матеріали. Цементи. Відбір і підготовка проб [22].

Проби цементу до випробувань зберігають у сухому приміщенні.

Перед випробуванням цемент, воду та хімічні добавки витримують до набуття ними температури приміщення.

Для приготування зразків використовують звичайну питну воду згідно з ГОСТ 2874-82 Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством (Вода питна. Гігієнічні вимоги та контроль за якістю) [25].

Цемент зважують із точністю до 1 г, воду зважують або відміряють із точністю до 1 г або 1 мл.

##### **Устаткування та матеріали**

1. Струшувальний столик.

2. Форми для зразків-кубиків.

3. Машина для випробувань міцності на стиск згідно з ГОСТ 28840-90 Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования (Машины для випробування матеріалів на розтяг, стиск та згин. Загальні технічні вимоги) – прес ГМС-50 [23].

4. Ваги лабораторні.

Ваги лабораторні згідно з ГОСТ 24104-88 Весы лабораторные общего назначения и образцовые. Общие технические условия (Ваги лабораторні загального призначення та зразкові. Загальні технічні умови) з похибкою зважування не більше ніж  $\pm 0,1$  г [24].

#### Підготовка до проведення випробувань

Безпосередньо перед виготовленням зразків-кубиків внутрішню поверхню стінок форм і піддону змащують машинним мастилом.

Для кожного строку випробувань, що встановлений згідно програми випробувань, виготовлялось по три зразки-кубики.

Після закінчення строку зберігання зразки обережно розформовують, відповідним чином маркують, роблять відповідні заміри кубика для подальшого визначення площі перерізу грані зразка.

#### Опрацювання і наведення результатів випробувань

Границю міцності при стиску окремого зразка обчислюють як частку від ділення величини руйнівного навантаження (в кгс) на робочу площу зразка ( $\text{см}^2$ ), тобто на  $9 \text{ см}^2$ .

Границю міцності зразків при стиску обчислюють як середнє арифметичне значення з двох найбільших результатів отриманих при випробуванні трьох зразків. Кожен результат наводять із точністю не менше ніж 0,1 МПа.

У звіті про випробування мають бути наведені всі одиничні результати. Окрім того, слід навести обчислене середнє арифметичне значення та вказати відкинутий найменший результат.

Основною задачею було концентрувати й фіксувати тепло, яке виділяє цемент при гідратації. Для цього досліджувані зразки помістили в прилад на дерев'яні підставки, ізолювали від зовнішнього середовища за допомогою мінеральної вати, яка захищала дно приладу та пінопласту, який розташовувався біля стінок і в складі кришки термосу. Всі можливі отвори ізолювали, щоб не було ніякого доступу повітря. Це дало змогу повністю контролювати температуру всередині приладу без втрат теплоти.

Внутрішню частину приладу розігрівали до  $+18^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  (за допомогою вбудованої лампи, яка підключалась до електромережі) і спостерігали за зміною температур зразків протягом 15 годин за встановленими термометрами.

Термометри заглиблювали у металеві “втулки”, в які наливали 1-2 мл технічного (термостійкого) масла. Таким чином можна було виміряти температуру зразків, яка передавалася через “втулки”, розміщені в цементному тісті до термометрів.

Всього було виготовлено 16 зразків по 4 за один дослід (термометри і зразки цементного тіста нумерувалися для подальшої ідентифікації отриманих результатів). Відповідно, було використано 5 термометрів, один із них застосовувався для контролю температури всередині приладу.

Досліди проводилися зі змінними факторами, які наведені в матриці планування експерименту (табл. 5.2). Приготування та розрахунок кількості хімічних добавок та води анологічний дослідом на визначення міцності портландцементу (пункти 3.2, 3.3).

## РОЗДІЛ 4 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

### 4.1 Портландцемент

Для проведення експериментів застосовувався портландцемент марки ПЦ І-500-Н ВАТ “Евроцемент-Україна”, м. Балаклія згідно ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Строительные материалы. Цементы общестроительного назначения. Технические условия [27].

Випробування цементу проводилося у відповідності з вимогам, які наведені у ГОСТ 310.2-76 [28]; ДСТУ Б.В.2.7-185:2009 [21]; ДСТУ Б.В.2.7-187:2009 [23].

Результати випробувань порівнювалися з вимогами ДСТУ Б В. 2.7-112-2002 Цементи. Загальні технічні умови [29] і наведені в табл. 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 <sup>2</sup> /т	Не нормується	2500

### 4.2 Вода

Вода для проведення випробувань повинна відповідати вимогам ДСТУ ISO 3696:2003 Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння (ISO 3696:1987, IDT) [26].

Вода для зразків використовувалась водопровідна. Річкова, озерна та вода із штучних водойм придатна також, якщо вона не забруднена в

неприпустимих межах стічними викидами, солями, мастилами тощо. У морській воді у великій кількості містяться розчинні солі, сульфат-іони, хлор-іони.

Можна застосовувати воду, яка показує слабо кислу чи слабо лужну реакцію, що визначається значенням водневого показника рН у межах 4,0-12,5 і відповідає технічним умовам. На застосування стічних вод, крім того, потрібно одержати дозвіл санепідемстанції.

Органічні речовини у воді, особливо такі, що містять цукор та феноли, сповільнюють процес гідратації цементу й знижують міцність бетону. Вміст кожного з них не повинен перевищувати 10 мг/л води.

Домішки нафтопродуктів, мастил, жирів, осідаючи на поверхні цементних зерен, сповільнюють їх гідратацію, а вкриваючи заповнювачі, перешкоджають їхньому зчепленню з цементним каменем. Тому на поверхні води замішування не повинно бути плівок цих домішок.

### **4.3 Хімічні добавки**

#### **Хлорид кальцію**

Для випробувань застосовувався кальцій хлорид 2-водний, чистий ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) згідно ТУ 6-09-5077-83 Кальцій хлористый [31], партія 22.

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

Область застосування: в хімічній промисловості, хімлабораторіях як реактив при аналізах, холодильній техніці, будівництві та виготовленні будівельних матеріалів (як прискорювач процесу твердіння бетонів, при виготовленні силікатної цегли, тротуарної плитки) тощо.

Показники якості чистого хлориду кальцію наведені в таблиці 4.2 (згідно ТУ 6-09-5077-83 [31]).

Таблиця 4.2

Показники якості хлориду кальцію

Найменування показників	Норма, мас.час., %
Кальцій хлористий ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	>98
Нерозчинні у воді речовини	<0,05
Сульфати ( $\text{SO}_4$ )	<0,05
Залізо (Fe)	<0,004
Калій і натрій (K, Na)	<0,2
Магній (Mg)	<0,05
Важкі метали (Pb)	<0,001

### Нітрит натрію

Натрій азотнокислий, чда (чистий для аналізу) –  $\text{NaNO}_2$  згідно ГОСТ 4197-74 Реактивы. Натрий азотистокислый. Технические условия [32].

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

Область застосування: у хімічному синтезі, харчовій промисловості, будівництві, як протиморозна добавка при зведенні монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій, в якості інгібітора атмосферної корозії та ін.

Показники якості чистого для аналізу натрія азотнокислого наведені в таблиці 4.3 (згідно ГОСТ 4197-74 [32]).

Таблиця 4.3

### Показники якості натрія азотнокислого

Найменування показників	Норма, мас.час., %
Нітрит натрію ( $\text{NaNO}_2$ )	>99
Нерозчинні у воді речовини	<0,005
Хлориди (Cl)	<0,01
Сульфати ( $\text{SO}_4$ )	<0,01
Залізо (Fe)	<0,0004
Калій (K)	<0,001
Важкі метали (Pb)	<0,0005

### Сульфат натрію

Сульфат натрію кристалізаційний (сірчаноокислий натрій) –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  згідно ГОСТ 6318-77 Натрий серноокислый технический. Технические условия [33].

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

Область застосування: при переробці деревини, в будівництві як протиморозна добавка та прискорювач твердіння бетонної суміші, виробництві синтетичних миючих засобів; розчини сульфату натрію використовуються як акумулятор тепла в пристроях, що зберігають сонячну енергію.

Показники якості сірчаноокислого натрію наведені в таблиці 4.4 (згідно ГОСТ 6318-77 [33]).

Таблица 4.4

Показники якості сірчаноокислого натрію

Найменування показників	Норма, мас. част., %
Сульфат натрію ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	>99,4
Нерозчинні у воді речовини	<0,4
Хлориди у перерахунку на $\text{NaCl}$	<0,2
Іони магнію ( $\text{Mg}^{2+}$ )	<0,02
Залізо у перерахунку на $\text{Fe}_2\text{O}_3$	<0,01
Вода	<0,1

#### Соляна кислота

Хлористий водень –  $\text{HCl}$  згідно ГОСТ 3118-77 Реактивы. Кислота соляная. Технические условия [34].

Хлоридна кислота належить до найсильніших кислот. Концентрована хлоридна кислота містить 37%  $\text{HCl}$  і має густину  $1,19 \text{ г/см}^3$ . Технічна кислота має жовтий колір, який обумовлюється домішками головним чином солей заліза.

Область застосування: використовується в народному господарстві, хімічній промисловості для добування різних солей: хлориду цинку, хлориду барію, в металургійній промисловості для виділення кольорових і рідкісних металів з їх природних сумішей, у невеликих кількостях з неї також одержують водень і хлор.

Показники якості соляної кислоти наведені в таблиці 4.5 (згідно ГОСТ 3118-77 [34]).

Таблиця 4.5

Показники якості соляної кислоти

Найменування показників	Норма, мас.част., %
Хлористого водню (HCl)	>33
Заліза (Fe)	<0,002
Вільного хлору	<0,002
Арсену (As)	<0,0001
Ртуті (Hg)	<0,0004

## **РОЗДІЛ 5 ПОЯСНЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **5.1 Вибір оптимального складу комплексної хімічної добавки**

Робота поділена на декілька етапів:

I - вибір типу й оптимальної кількості хімічних добавок-прискорювачів твердіння;

II - розробка способу приготування високодисперсних мінеральних речовин – центрів кристалізації;

III - відпрацювання технологічних режимів виготовлення й твердіння бетонних виробів.

В даному підрозділі наводяться результати першого етапу. Використовувались відомі хімічні добавки: хлорид кальцію ( $\text{CaCl}_2$ ), хлорид заліза ( $\text{FeCl}_3$ ), нітрит натрію ( $\text{NaNO}_2$ ), сульфат натрію ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), карбонат калію ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), суперпластифікатор С-3, спеціально підготовлений і певним способом оброблений гідратований цемент (СРН).

Досліджувались добавки одиничні, подвійні й такі, що вміщували по три або чотири хімічних речовин. Всього проведено 120 дослідів, результати яких були оброблені за допомогою табличного редактора Excel

#### **5.1.1 Вплив хімічних добавок на терміни тужавлення і міцність затверділого цементу**

За обмеженістю об'єму дипломної роботи в таблиці 5.1 наведені терміни тужавлення та характеристики міцності цементів із вмістом найбільш перспективних комбінацій добавок, що залишились після “відсіювання” комп'ютерною програмою.

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 <sup>15</sup>	4 <sup>30</sup>	33,7	57,8	76,6
2	CaCl <sub>2</sub>	1 <sup>30</sup>	2 <sup>15</sup>	45,7	69,1	86,6
3	FeCl <sub>3</sub>	1 <sup>25</sup>	2 <sup>40</sup>	30,5	50,6	100,6
4	NaNO <sub>2</sub>	2 <sup>30</sup>	4 <sup>20</sup>	42,4	66,4	62,9
5	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0 <sup>50</sup>	1 <sup>25</sup>	19,7	41,3	60,9
6	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 <sup>30</sup>	1 <sup>55</sup>	33,7	56,3	74,5
7	C-3	5 <sup>30</sup>	8 <sup>15</sup>	34,1	59,6	72,1
8	CPH	2 <sup>00</sup>	2 <sup>50</sup>	43,7	68,1	83,0
9	CPH + C-3	4 <sup>35</sup>	4 <sup>40</sup>	43,5	53,4	88,7
10	CaCl <sub>2</sub> + NaNO <sub>2</sub>	2 <sup>00</sup>	2 <sup>45</sup>	51,7	69,0	82,4
11	CaCl <sub>2</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2 <sup>05</sup>	4 <sup>35</sup>	42,5	72,9	99,3
12	CaCl <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2 <sup>10</sup>	4 <sup>25</sup>	42,2	58,4	78,4
13	CaCl <sub>2</sub> + C-3	3 <sup>05</sup>	5 <sup>50</sup>	44,1	61,2	97,1
14	CaCl <sub>2</sub> + CPH	1 <sup>20</sup>	2 <sup>00</sup>	44,6	71,7	119,9
15	NaNO <sub>2</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0 <sup>15</sup>	0 <sup>25</sup>	19,1	38,5	46,1
16	NaNO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3 <sup>25</sup>	4 <sup>25</sup>	44,5	74,9	100,9
17	NaNO <sub>2</sub> + C-3	4 <sup>00</sup>	5 <sup>00</sup>	28,9	59,1	63,3
18	NaNO <sub>2</sub> + CPH	2 <sup>35</sup>	3 <sup>45</sup>	36,6	73,4	95,2
19	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0 <sup>05</sup>	0 <sup>10</sup>	25,4	31,1	56,3
20	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + C-3	1 <sup>30</sup>	2 <sup>00</sup>	29,0	39,0	69,7
21	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + CPH	0 <sup>05</sup>	0 <sup>15</sup>	26,5	39,6	62,3
22	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + C-3	4 <sup>30</sup>	7 <sup>25</sup>	37,2	44,3	57,1
23	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + CPH	3 <sup>00</sup>	4 <sup>05</sup>	36,2	42,1	91,0
24	CaCl <sub>2</sub> + CPH + C-3	3 <sup>00</sup>	3 <sup>30</sup>	40,0	53,9	80,2
25	CaCl <sub>2</sub> + NaNO <sub>2</sub> + C-3	2 <sup>50</sup>	3 <sup>20</sup>	46,5	67,8	69,2
26	CaCl <sub>2</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + C-3	0 <sup>20</sup>	0 <sup>30</sup>	46,9	70,6	78,3
27	CaCl <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + C-3	0 <sup>40</sup>	4 <sup>35</sup>	37,4	59,6	66,8
28	CaCl <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + CPH	1 <sup>40</sup>	2 <sup>15</sup>	43,0	65,4	77,7
29	CaCl <sub>2</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + CPH	0 <sup>10</sup>	0 <sup>30</sup>	47,5	76,5	70,9
30	CaCl <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + CPH	2 <sup>20</sup>	4 <sup>15</sup>	51,5	67,8	82,4
31	NaNO <sub>2</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + C-3	1 <sup>25</sup>	1 <sup>35</sup>	31,5	59,5	89,4
32	NaNO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + C-3	0 <sup>40</sup>	4 <sup>55</sup>	26,5	64,3	75,9
33	NaNO <sub>2</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + CPH	0 <sup>05</sup>	0 <sup>15</sup>	34,9	49,3	51,4
34	NaNO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + CPH	4 <sup>15</sup>	5 <sup>15</sup>	39,0	39,8	79,5
35	NaNO <sub>2</sub> + C-3 + CPH	3 <sup>20</sup>	4 <sup>35</sup>	26,0	42,9	68,1
36	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + C-3 + CPH	1 <sup>10</sup>	1 <sup>20</sup>	23,3	48,5	74,3

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7
37	$K_2CO_3 + Na_2SO_4 + C-3$	$0^{40}$	$0^{50}$	44,0	50,3	83,6
38	$K_2CO_3 + Na_2SO_4 + CPH$	$0^{10}$	$0^{15}$	30,7	42,2	64,9
39	$Na_2SO_4 + C-3 + CPH$	$5^{55}$	$6^{10}$	39,8	64,2	75,0
40	$CaCl_2 + NaNO_2 + C-3 + CPH$	$1^{55}$	$2^{45}$	51,8	61,3	96,3
41	$CaCl_2 + K_2CO_3 + C-3 + CPH$	$0^{20}$	$0^{40}$	38,2	56,6	70,0
42	$CaCl_2 + Na_2SO_4 + C-3 + CPH$	$2^{35}$	$4^{20}$	43,7	62,7	79,0
43	$NaNO_2 + Na_2SO_4 + C-3 + CPH$	$2^{20}$	$4^{40}$	38,1	49,9	82,9
44	$K_2CO_3 + Na_2SO_4 + C-3 + CPH$	$0^{35}$	$0^{40}$	41,3	51,2	67,2
45	$CaCl_2 + NaNO_2 + Na_2SO_4$	$2^{40}$	$3^{50}$	38,5	62,3	65,7
46	$CaCl_2 + NaNO_2 + Na_2SO_4 + CPH$	$2^{30}$	$3^{15}$	43,9	64,0	75,1
47	$CaCl_2 + Na_2SO_4 + K_2CO_3 + CPH$	$0^{15}$	$1^{15}$	50,0	66,6	68,4
48	$CaCl_2 (0,5) + Na_2SO_4 (0,5) + NaNO_2 (0,5) + CPH$	$2^{20}$	$3^{35}$	54,4	68,0	79,3

Серед одиничних добавок, які вводились у кількості 1,5% від маси цементу можна описати нижче наведені спостереження.

Хлорид кальцію за літературними даними збільшує розчинність клінкерних мінералів по вапну, тому спостерігається підвищення міцності в усі терміни твердіння. Одночасно  $CaCl_2$  є й прискорювачем процесу тужавлення [15].

Хлорид заліза сприяє одержанню самої високої міцності у 7 добовому віці, але в початковий період ефекту прискорення твердіння не дає. Потребує введення води замішування на 9-11% більше, ніж бездобавочний цемент.  $FeCl_3$  не сумісний із нітритом натрію, тому з подальших досліджень він був виключений.

Нітрит натрію без особливого скорочення термінів тужавлення в деякій мірі відіграє роль прискорювача у першу та другу добу, але виявляється гальмування швидкості гідратації в подальшому.

Карбонат калію викликає дуже швидке структуроутворення у перший період, терміни тужавлення різко скорочуються, але впливу на прискорення твердіння цементу не спостерігається.

Сульфат натрію за літературними даними не має собі рівних щодо збільшення міцності цементу одразу після пропарювання. Сульфати збільшують розчинність клінкерних мінералів портландцементу по кремнезему, створюються кращі умови для гідратації мінералів, але при нормальних режимах прискорюючого ефекту твердіння не виявлено [15].

Суперпластифікатор С-3 широко застосовується в технології бетонів і будівельних розчинів. Основне призначення суперпластифікатора: розрідження й надання рухливості бетонній суміші, а також незначне зниження витрат цементу. За рахунок його введення різко збільшуються терміни тужавлення, підвищення міцності порівняно з бездобавочним цементом звичайно не спостерігається.

Цікаво відмітити роль мінеральної добавки – центру кристалізації (СРН). Без яких-небудь інших хімічних добавок міцність портландцементу збільшилась у першу добу в 1,3 рази, у дві доби – 1,2 рази, а через 7 діб – 1,09 рази. Вплив СРН на швидкість твердіння цементу у початкові терміни можна порівняти із дією  $\text{CaCl}_2$  у кількості 1,5%.

Як відмічалось раніше, СРН – це заздалегідь гідратований за особливою технологією портландцемент. В ньому гідросилікати знаходяться в гелеподібному стані, але більш окристалізовані у порівнянні із цементним каменем звичайного бетону. Ці часточки гідросилікатів утворюють просторову структуру в “стиснених умовах” і можуть бути центрами кристалізації.

В теорії структуроутворення й твердіння в’язучих систем відмічається наявність індукційного періоду, коли швидкість гідратації зменшується у 15 разів. Деякі дослідники закінчення індукційного періоду пов’язують із кристалізацією  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В високодисперсній мінеральній добавці гідратованого цементу безумовно присутній гідроксид кальцію у

закристалізованій формі і, вочевидь, це впливає на скорочення індукційного періоду.

Комплексні добавки в бетон відрізняються поліфункціональністю своєї дії. Вони впливають одночасно на декілька характеристик бетону. Використання комплексних добавок підсилює ефект, що досягається при введенні однокомпонентної добавки (приріст міцності), або усуває негативну побічну дію (корозія арматури, усадка тощо).

В наших дослідженнях концентрація хімічних речовин в комплексних добавках підтримувалась 1% кожної від маси цементу.

У комбінаціях одиничних добавок в комплексні різко виділяється:  $\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2$ ;  $\text{CaCl}_2 + \text{CPH}$ ;  $\text{NaNO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ , які дають значний приріст міцності в усі терміни випробувань;  $\text{NaNO}_2 + \text{CPH}$ ;  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CPH}$  без особливого ефекту в першу добу, збільшують міцність у 7 добовому віці і це, безумовно, за рахунок наявності CPH.

Карбонат калію у будь-яких комбінаціях, і навіть разом із суперпластифікатором С-3, різко скорочує терміни тужавлення (до 15-25 хв.), що унеможливорює його практичне використання.

Серед потрійних комплексних добавок заслуговують на увагу:  $\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{C-3}$ ;  $\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{CPH}$ ;  $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CPH}$ ; а також чотирьохкомпонентна добавка –  $\text{CaCl}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{C-3} + \text{CPH}$ . Ці добавки вже в першу добу збільшують міцність цементного каменю у 1,5 рази при збереженні більш високої швидкості твердіння в інші терміни.

Результати дослідження показують, що практично в усіх випадках з найкращими показниками міцності в комплексних добавках присутній хлорид кальцію, визнаний у всьому світі як ефективний прискорювач твердіння цементу й бетону. На жаль, хлорид-іони викликають інтенсивну корозію арматури, особливо при вмісті  $\text{CaCl}_2$  більше ніж 1%.

В літературі існують повідомлення, що негативну дію хлориду кальцію на арматуру залізобетону практично повністю усуває нітрит натрію [15]. Більш за те,  $\text{NaNO}_2$  при 20°C в кількості 2% скорочує індукційний період

гідратації трикальцієвого силікату з 7 год. до 20 хв. Дія  $\text{NaNO}_2$  на кінетику гідратації  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  в початкові терміни подібна впливу тепловологісної обробки, яка прискорює гідратацію аліту тільки після утворення зародків гідросилікатів. Результати наших дослідів підтверджують ці судження у разі використання  $\text{NaNO}_2$  в поєднанні із мінеральною добавкою – центром кристалізації.

Щоб зменшити негативну дію  $\text{CaCl}_2$  на арматуру, але використати його позитивний вплив на швидкість гідратації цементу, пропонується подальше дослідження комплексної добавки складу:  $\text{CaCl}_2$  – 0,5%;  $\text{NaNO}_2$  – 0,5%;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 0,5%; СРН – 1,5%. В ній кожна із хімічних речовин підсилює дію іншої, в результаті портландцемент у присутності такої комплексної добавки показує стабільне нарощування міцності в усі терміни твердіння, а в першу добу приріст міцності складає 61% від цементу без добавок.

Отже, для підвищення швидкості гідратації портландцементу у початковій період і усунення негативного впливу хлориду на арматуру залізобетонних виробів доцільно використовувати хімічну добавку, яка включає хлорид кальцію, нітрит натрію і сульфат натрію у кількості 0,5% від маси цементу кожної речовини у поєднанні із спеціально підготовленою і певним способом обробленою затравки – центру кристалізації.

## **5.2 Розробка способу приготування мінеральної добавки – центру кристалізації**

Як свідчать попередні результати, в прискоренні твердіння портландцементу важливу роль відіграє мінеральна затравка – центр кристалізації.

Мінеральна добавка – попередньо гідратований цемент (СРН), виготовлялась шляхом твердіння цементного тіста при В/Ц = 0,45 протягом трьох місяців.

Оскільки мінеральну затравку отримували із заздалегідь гідратованого цементу, то її піддавали подрібненню у кульовому млині. Щоб визначити

вплив тонкості помелу на процеси структуроутворення і швидкість набору міцності помел здійснювали у сухому і водному стані протягом 2, 4, 6 год.

Гранулометричний склад добавки визначався просіюванням на ситах № 016, № 008, № 005. Використовували 3 фракції: 0,16 – 0,08; 0,08 – 0,05 і менше ніж 0,05 мм.

Тонкість помелу оцінювали за залишком на ситах № 008 і № 005, який складав відповідно: при 2-<sup>x</sup> годинному помелі 13,9 і 29,2%, при 4-<sup>x</sup> годинах 4,9 і 27,4%, а при 6 годинах – 0,0 і 6,5%.

Кількість мінеральної затравки змінювалась: 1,5; 3,0; 4,5% від маси цементу.

Гідратований портландцемент вміщував 31,2%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , що було визначено титруванням соляною кислотою. Така велика кількість гідроксиду кальцію штучно вноситься в дослідний цемент до початку гідратації, тому він безумовно впливатиме на кінетику процесу структуроутворення. Для зменшення кількості введеного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в водну суспензію затравки додавали розчин соляної кислоти із розрахунку нейтралізації 30, 60 і 90% гідроксиду кальцію, тим самим у системі збільшувався вміст  $\text{CaCl}_2$ , який утворився під час нейтралізації.

Для виявлення ролі мінеральної затравки (СРН) проведено трьохфакторний експеримент, який наведений у таблиці 5.2.

Змінні фактори:

$X_1$  – вміст СРН, %: 1,5; 3,0; 4,5;

$X_2$  – тривалість помелу СРН, год: 2; 4; 6;

$X_3$  – ступінь нейтралізації СРН, %: 30; 60; 90.

Таблиця 5.2

Трьохфакторний експеримент для виявлення ролі СРН у цементному тісті

№ досліджу	Рівні змінних факторів			Чисельні значення змінних факторів		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	+1	+1	+1	4,5	6	90
2	-1	+1	+1	1,5	6	90
3	+1	-1	+1	4,5	2	90
4	-1	-1	+1	1,5	2	90
5	+1	+1	-1	4,5	6	30
6	-1	+1	-1	1,5	6	30
7	+1	-1	-1	4,5	2	30
8	-1	-1	-1	1,5	2	30
9	+1	0	0	4,5	4	60
10	-1	0	0	1,5	4	60
11	0	+1	0	3,0	6	60
12	0	-1	0	3,0	2	60
13	0	0	+1	3,0	4	90
14	0	0	-1	3,0	4	30
15	0	0	0	3,0	4	60
16	0	0	0	3,0	4	60
17	0	0	0	3,0	4	60

### 5.2.1 Залежність термінів тужавлення портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

#### *Початок тужавлення ПЦ*

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

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

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

На рис. 5.1, 5.2, 5.3 показана залежність початку термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН на трьох рівнях: максимальному, нульовому, мінімальному.

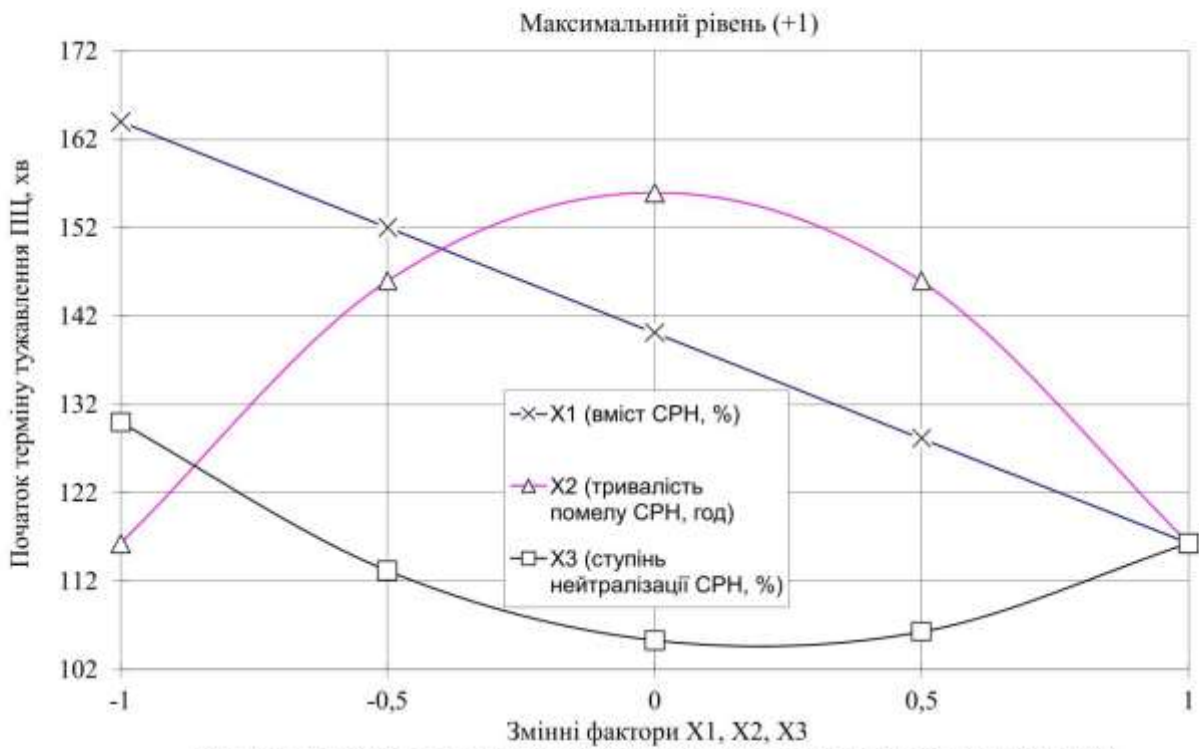
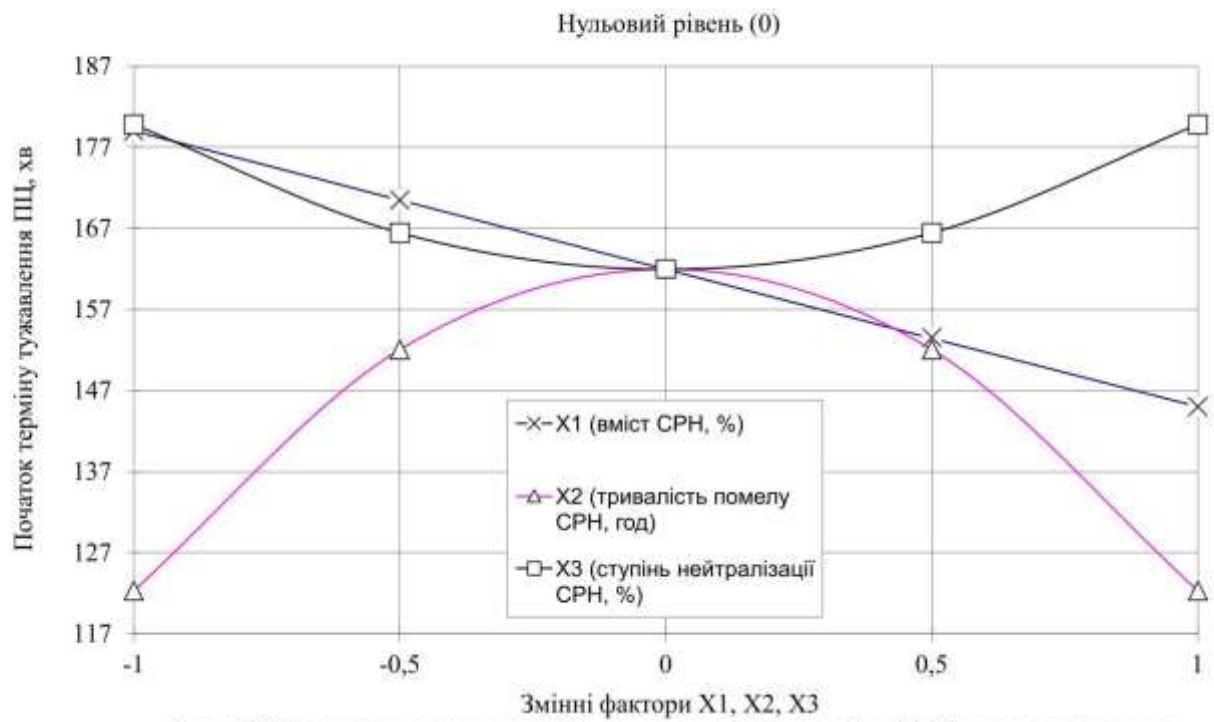


Рис. 5.1 Залежність початку термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

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

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



Змінні фактори X1, X2, X3  
Рис. 5.2 Залежність початку термінів тузавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

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

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

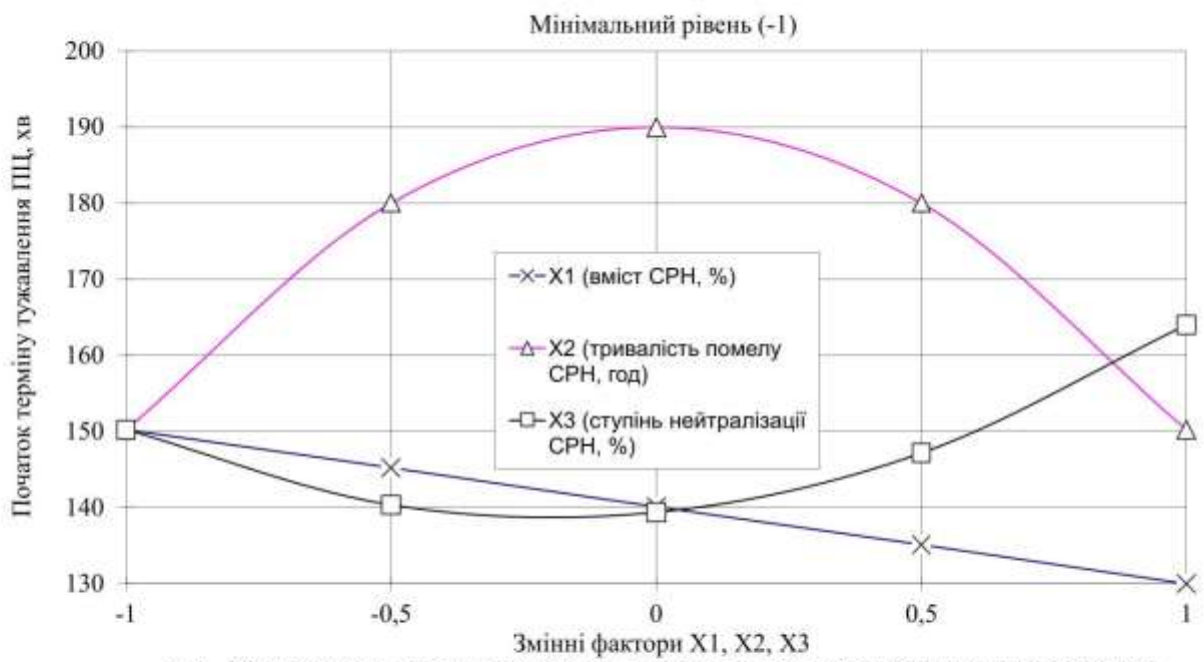


Рис. 5.3 Залежність початку термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

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

$$F_2 < F_7 \quad (16,5 < 19,3)$$

Аналіз графіків показує, що найбільший вплив на початок терміну тужавлення портландцементу на всіх рівнях експерименту чинить вміст СРН і тривалість помелу СРН, в меншій мірі – ступінь нейтралізації гідратованого цементу.

#### *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 рис. 5.4, 5.5, 5.6 зображено залежність кінця термінів тужавлення від аналогічних змінних факторів, які наведені вище.

Аналіз графіків показує, що найбільший вплив на кінець терміну тужавлення портландцементу на всіх рівнях експерименту чинить вміст СРН і тривалість помелу СРН, в меншій мірі – ступінь нейтралізації гідратованого цементу.

#### **5.2.2 Залежність міцності портландцементу від тривалості помелу СРН, вмісту та ступеня нейтралізації СРН в 1 добовому віці**

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

$$Y_{\text{міц.}} = 43,968 - 0,67X_1 - 1,52X_2 + 0,55X_3 - 5,848X_1^2 + 7,002X_2^2 + 3,552X_3^2 - 3,363X_1X_2 - 1,713X_1X_3 - 1,638X_2X_3;$$
$$F_p < F_T (18,9 < 19,3)$$

Рисунки 5.7, 5.8, 5.9 розкривають залежність міцності ПЦ від тривалості помелу, вмісту, ступеня нейтралізації СРН в 1 добовому віці на трьох рівнях факторів.

Аналіз графіків показує, що найбільший вплив на міцність портландцементу чинить вміст СРН і в меншій мірі – тривалість помелу гідратованого цементу.

При знаходженні факторів на максимальному рівні, найбільша міцність ПЦ отримана при вмісті СРН – 2,25%, тривалості помелу СРН – 2 год, ступені нейтралізації СРН – 30%.

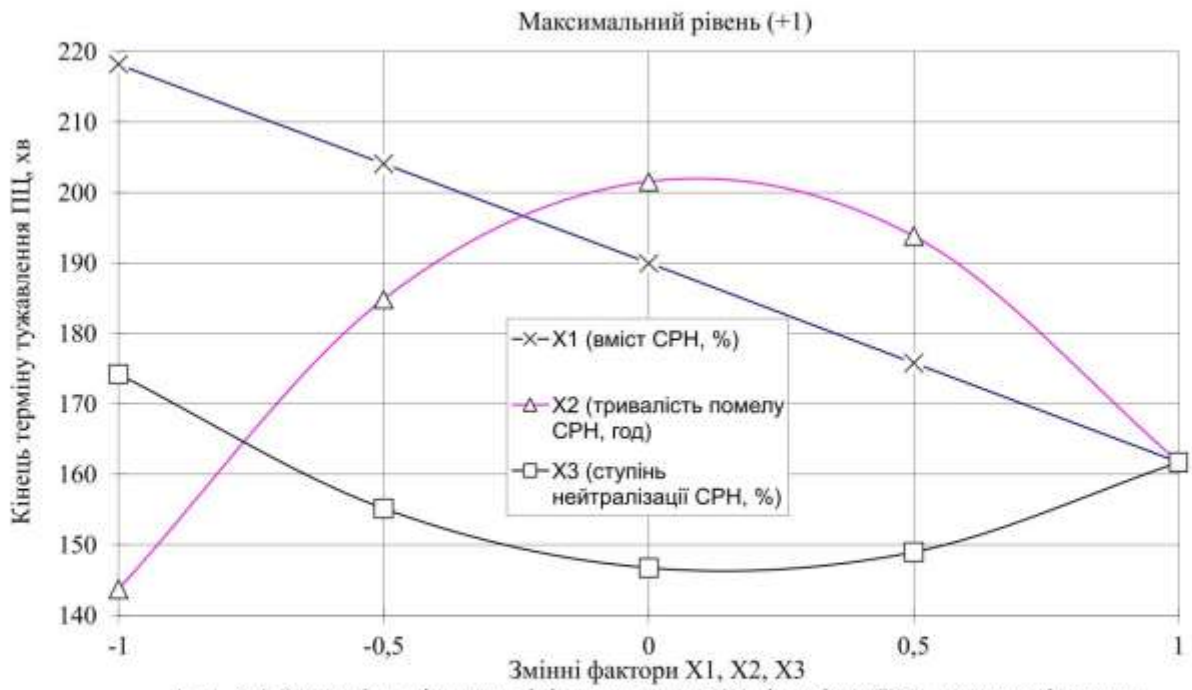


Рис. 5.4 Залежність кінця термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

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

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

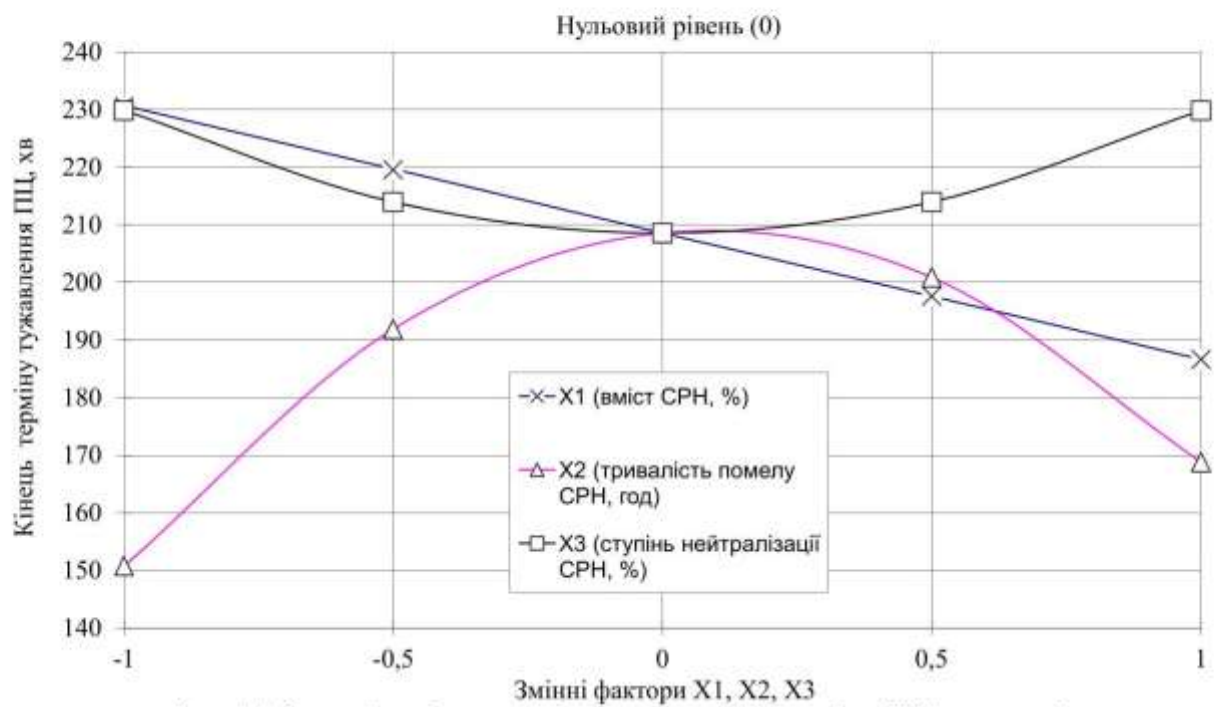


Рис. 5.5 Залежність кінця термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

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

$$F_p < F_\gamma (19,1 < 19,3)$$

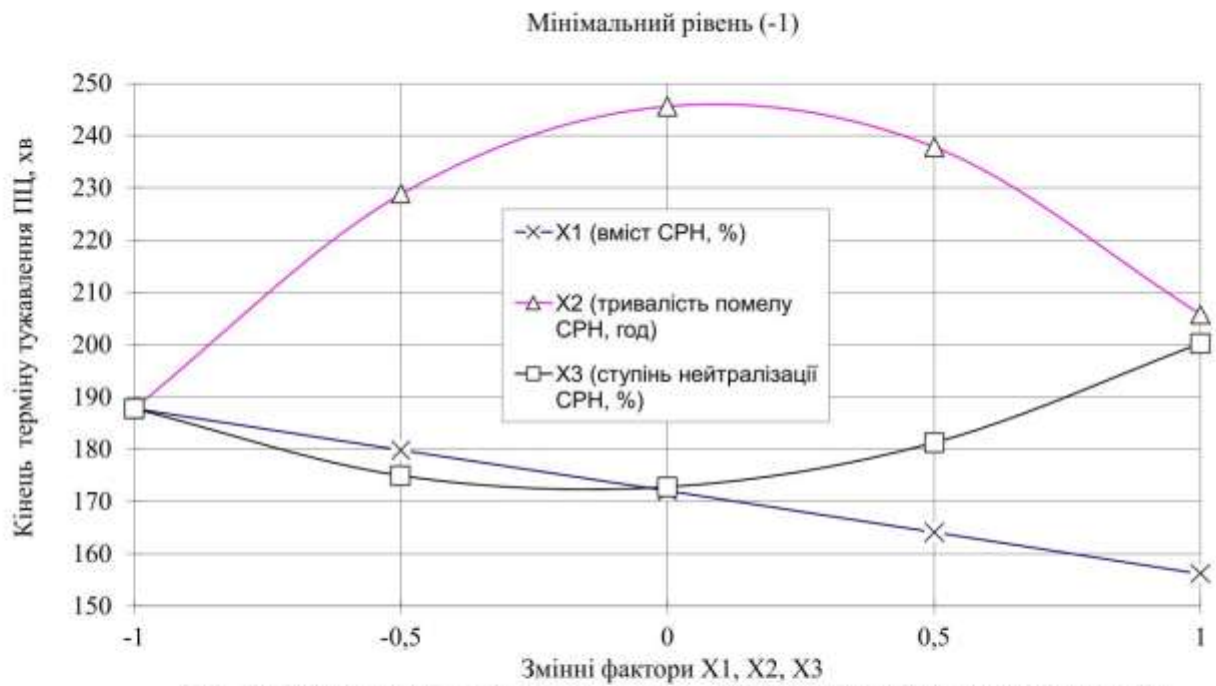


Рис. 5.6 Залежність кінця термінів тужавлення ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу СРН, ступеня нейтралізації СРН

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

$$F_p < F_\gamma \quad (19,1 < 19,3)$$

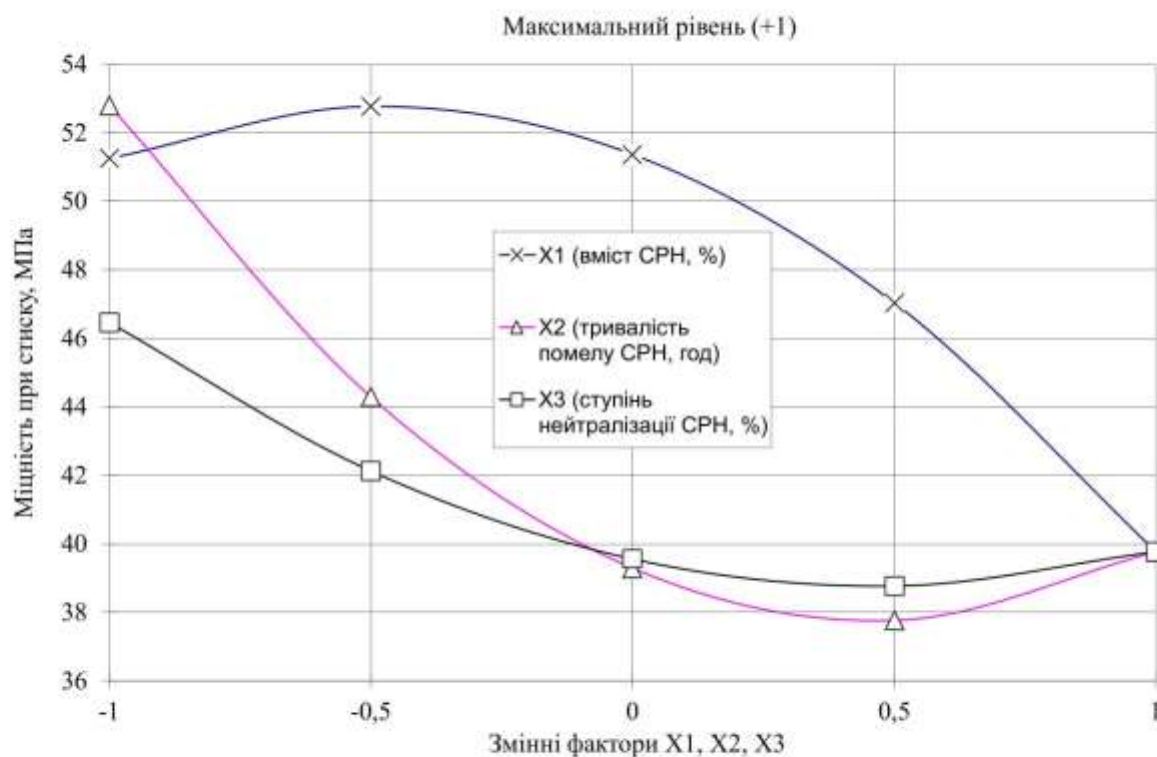


Рис. 5.7 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 1 добовому віці

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

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

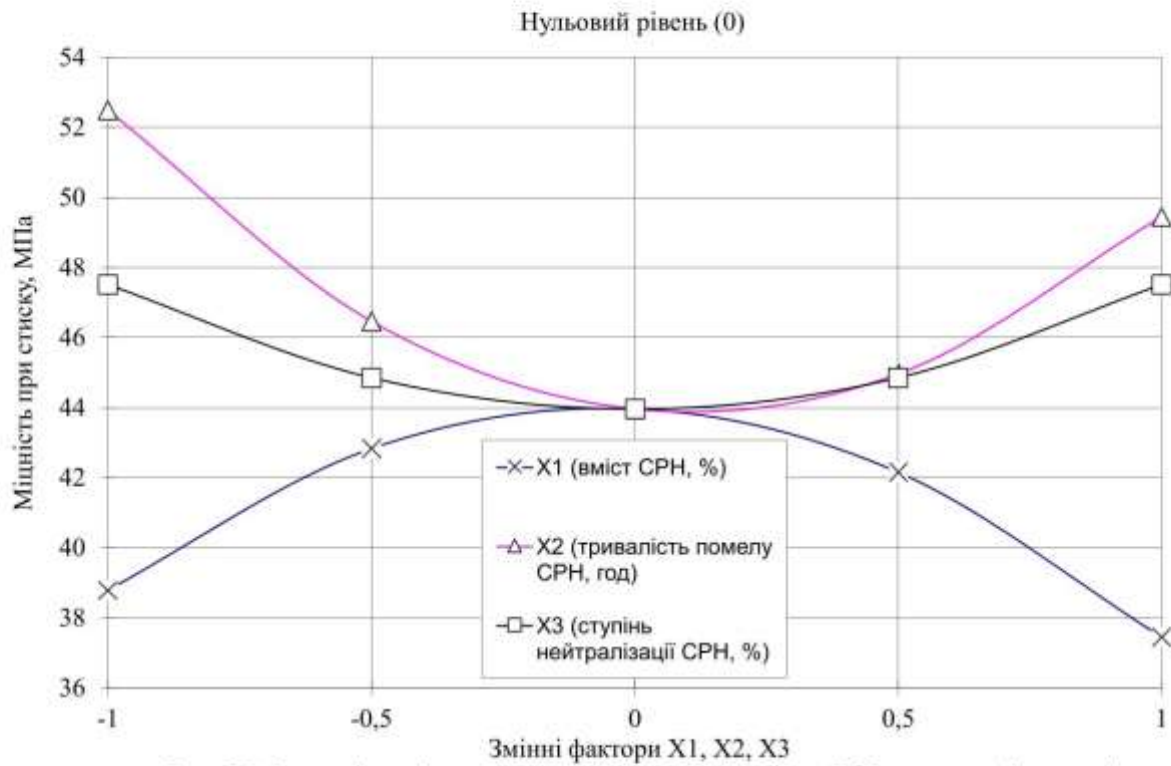


Рис. 5.8 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 1 добовому віці

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

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

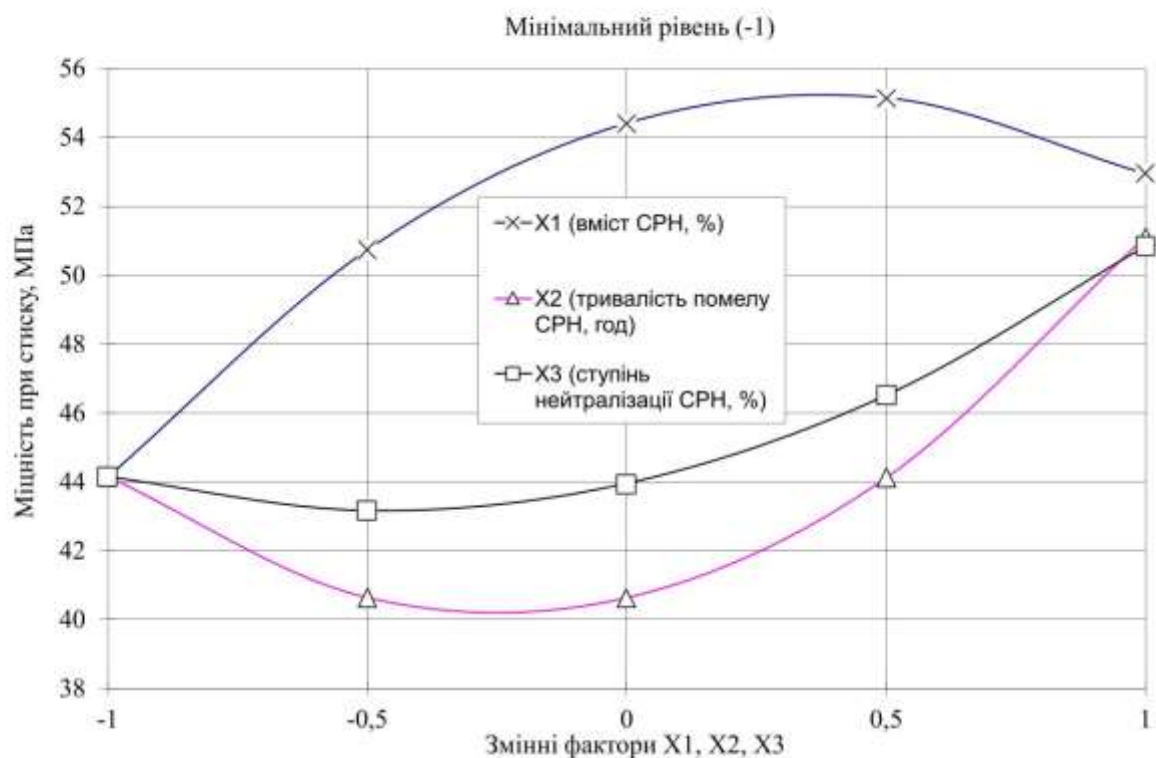


Рис. 5.9 Залежність міцності поргладцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 1 добовому віці

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

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

При знаходженні факторів на основному рівні, найбільша міцність цементу отримана при вмісті СРН – 3%, тривалості помелу СРН – 2 год, ступені нейтралізації – 30, 90%.

При знаходженні факторів на мінімальному рівні, найбільша міцність портландцементу отримана при вмісті СРН – 3,75%, тривалості помелу СРН – 6 год, ступені нейтралізації – 90%.

Результати проведених випробувань на міцність представлені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Характеристики міцності одержаних зразків  
Термін твердіння 1 доба

№ досл.	№ зразка	Розміри, см	Площа перерізу, см <sup>2</sup>	Руйнівне навантаження, кгс	Міцність при стиску	
					кгс/см <sup>2</sup>	МПа
1	2	3	4	5	6	7
1	1	3x3,2	9,6	3900	406,2	41,4
	2	3x3,2	9,6	3550	369,8	37,7
	3	3x3,2	9,6	<del>2900</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	388	39,6
2	1	3x3,2	9,6	<del>4000</del>	-	-
	2	2,9x3,2	9,3	4500	483,9	49,4
	3	3x3,2	9,6	5600	583,3	59,5
Середнє значення		-	-	-	533,6	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	<del>4400</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	556	56,7
4	1	2,9x3,2	9,3	4800	516	52,7
	2	3x3,2	9,6	<del>4200</del>	-	-
	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	<del>3300</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	478,1	48,8
6	1	2,9x3	8,7	4100	471,3	48,1
	2	2,9x3	8,7	<del>4000</del>	-	-
	3	2,9x3	8,7	4100	471,3	48,1
Середнє значення		-	-	-	471,3	48,1
7	1	3x3	9,0	<del>4050</del>	-	-
	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	<del>4000</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	443	45,2
9	1	3x3,1	9,3	3200	344,1	35,1
	2	3x3,1	9,3	<del>2200</del>	-	-
	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	<del>3400</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	386,2	39,4
11	1	3x3,1	9,3	<del>3700</del>	-	-
	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	<del>3800</del>	-	-
	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	<del>3600</del>	-	-
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	<del>4100</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	460,6	47,0
15	1	2,9x3,2	9,3	4000	430,1	43,9
	2	3x3,2	9,6	<del>3450</del>	-	-
	3	2,9x3,2	9,3	4250	457	46,6
Середнє значення		-	-	-	443,5	45,2
16	1	3x3,1	9,3	<del>3400</del>	-	-
	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	<del>3550</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	446,2	45,5

### 5.2.3 Вплив змінних факторів експерименту на міцність портландцементу в 2х добовому віці

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

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

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

Вплив змінних факторів експерименту на міцність портландцементу в 2<sup>x</sup> добовому віці інтерпретовано на рис. 5.10, 5.11, 5.12.

Аналіз графіків показує, що найбільший вплив на міцність портландцементу чинить вміст СРН і в меншій мірі – ступінь нейтралізації гідратованого цементу.

При знаходженні факторів на максимальному рівні, найбільша міцність цементу отримана при вмісті СРН – 2,25 і 3%, тривалості помелу СРН – 6 год, ступені нейтралізації СРН – 30%.

При знаходженні факторів на середньому рівні, найбільша міцність ПЦ отримана при вмісті СРН – 3%, тривалості помелу СРН – 6 год, ступені нейтралізації – 30 і 90%.

При знаходженні факторів на мінімальному рівні, найбільша міцність портландцементу отримана при вмісті СРН – 3%, тривалості помелу СРН – 6 год, ступені нейтралізації – 90%.

Характеристики міцності одержаних зразків (термін твердіння – 2 доби) наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Характеристики міцності одержаних зразків  
Термін твердіння 2 доби

№ досл.	№ зразка	Розміри, см	Площа перерізу, см <sup>2</sup>	Руйнівне навантаження, кгс	Міцність при стиску	
					кгс/см <sup>2</sup>	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	<del>4900</del>	-	-
	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	<del>4200</del>	-	-
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	<del>4900</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	567,5	57,9
5	1	3,1x3,1	9,6	5800	604,1	61,6
	2	3x3	9,0	<del>4750</del>	-	-
	3	2,9x3	8,7	6350	729,9	74,5
Середнє значення		-	-	-	667	68,1
6	1	3x3	9,0	<del>4350</del>	-	-
	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	<del>4700</del>	-	-
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	<del>5100</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	607,5	62,0

1	2	3	4	5	6	7
9	1	3x3,1	9,3	<del>3900</del>	-	-
	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	<del>4250</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	584,8	59,7
11	1	2,9x3,2	9,3	<del>5200</del>	-	-
	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	<del>4900</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	600	61,2
13	1	3x3	9,0	<del>5250</del>	-	-
	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	<del>5300</del>	-	-
	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	<del>5100</del>	-	-
	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	<del>5050</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	614	62,6
17	1	3x3,2	9,6	<del>5300</del>	-	-
	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 СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 7 добовому віці

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

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

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

Залежність міцності ПЦ від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації гідратованого цементу в 7 добовому віці показано на рисунках 5.13-5.15.

Аналіз графіків показує, що найбільший вплив на міцність портландцементу чинить вміст СРН і в меншій мірі – тривалість помелу СРН.

При знаходженні факторів на максимальному рівні, найбільша міцність ПЦ отримана при вмісті СРН – 3%, тривалості помелу СРН – 6 год, ступені нейтралізації СРН – 90%.

При знаходженні факторів на основному рівні, найбільша міцність портландцементу отримана при вмісті СРН – 2,25%, тривалості помелу СРН – 6 год, ступені нейтралізації – 30%. При знаходженні факторів на мінімальному рівні, найбільша міцність цементу отримана при вмісті СРН – 1,5%, тривалості помелу СРН – 2 год, ступені нейтралізації – 30%. Результати проведених випробувань на міцність цементу в 7 добовому віці представлені в таблиці 5.5.

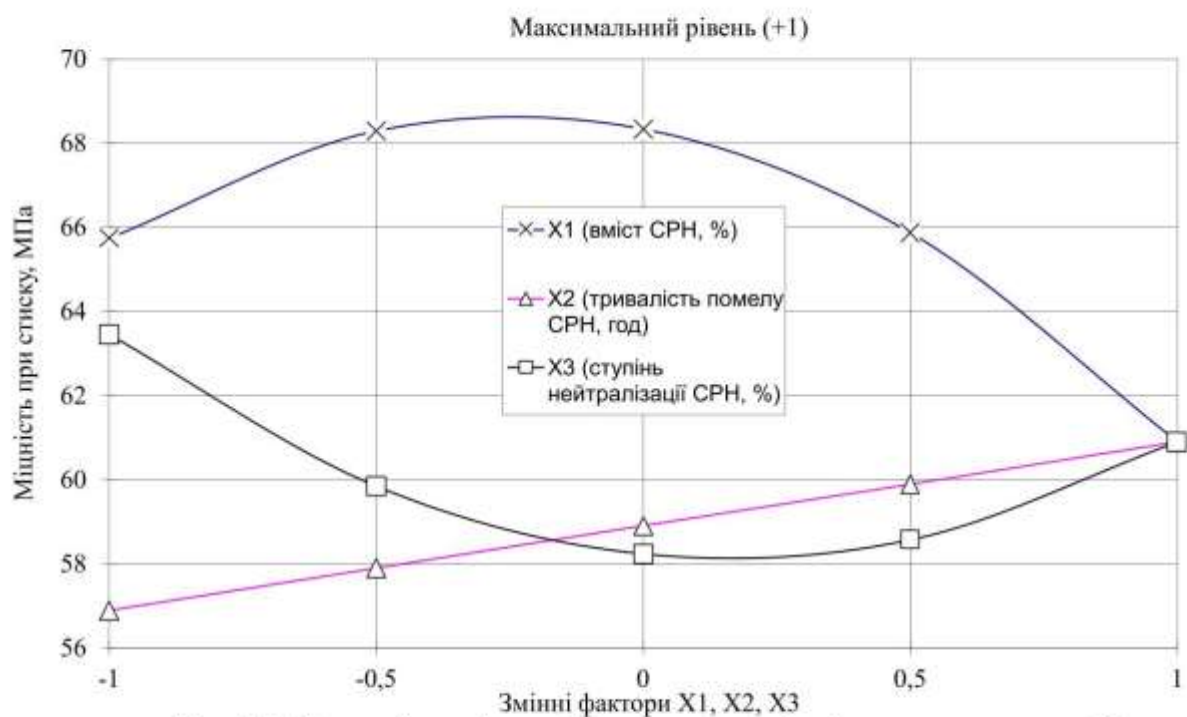


Рис. 5.10 Вплив змінних факторів експерименту на міцність портландцементу в 28 добовому віці

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

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

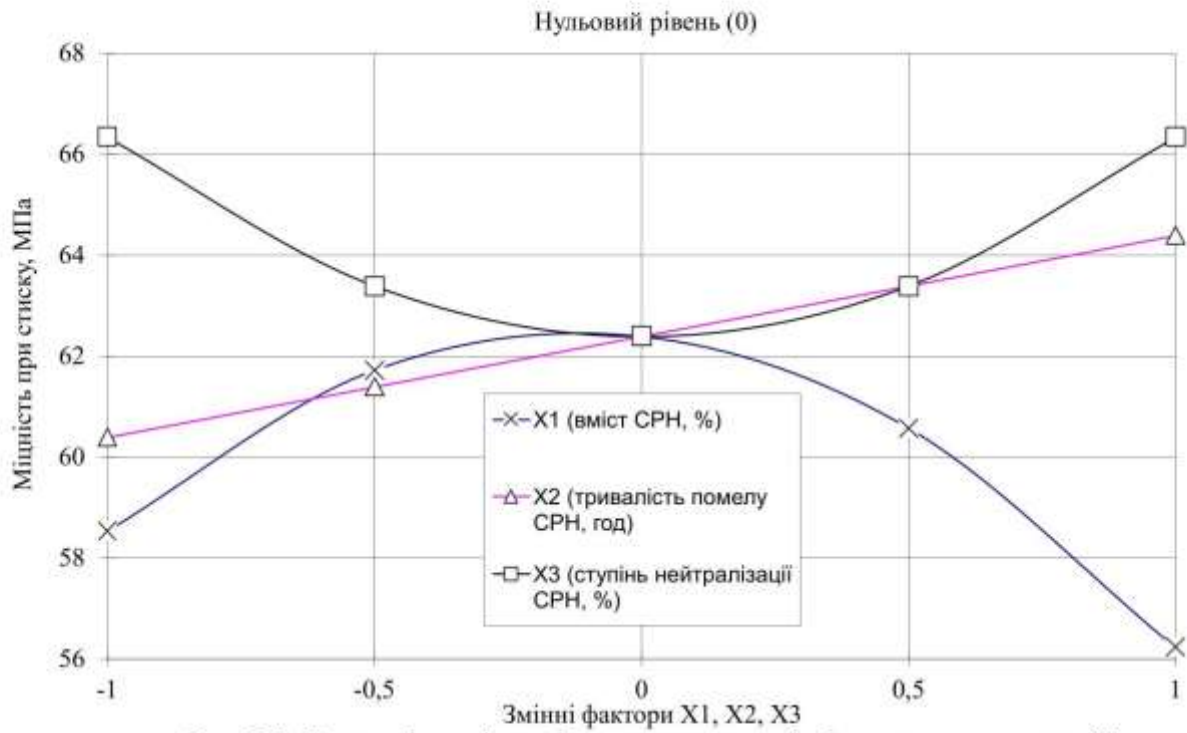


Рис. 5.11 Вплив змінних факторів експерименту на міцність портландцементу в 2<sup>х</sup> добовому віці

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

$$F_p < F_{\bar{\gamma}} \quad (18,1 < 19,3)$$

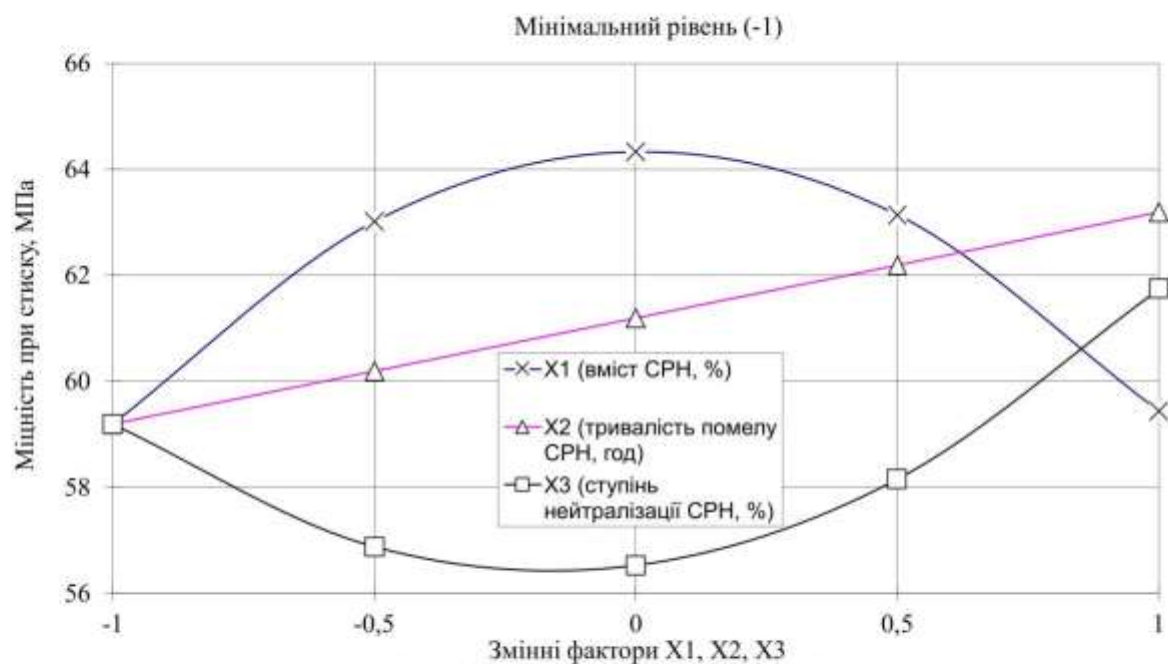


Рис. 5.12 Вплив змінних факторів експерименту на міцність портландцементу в  $2^x$  добовому віці

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

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

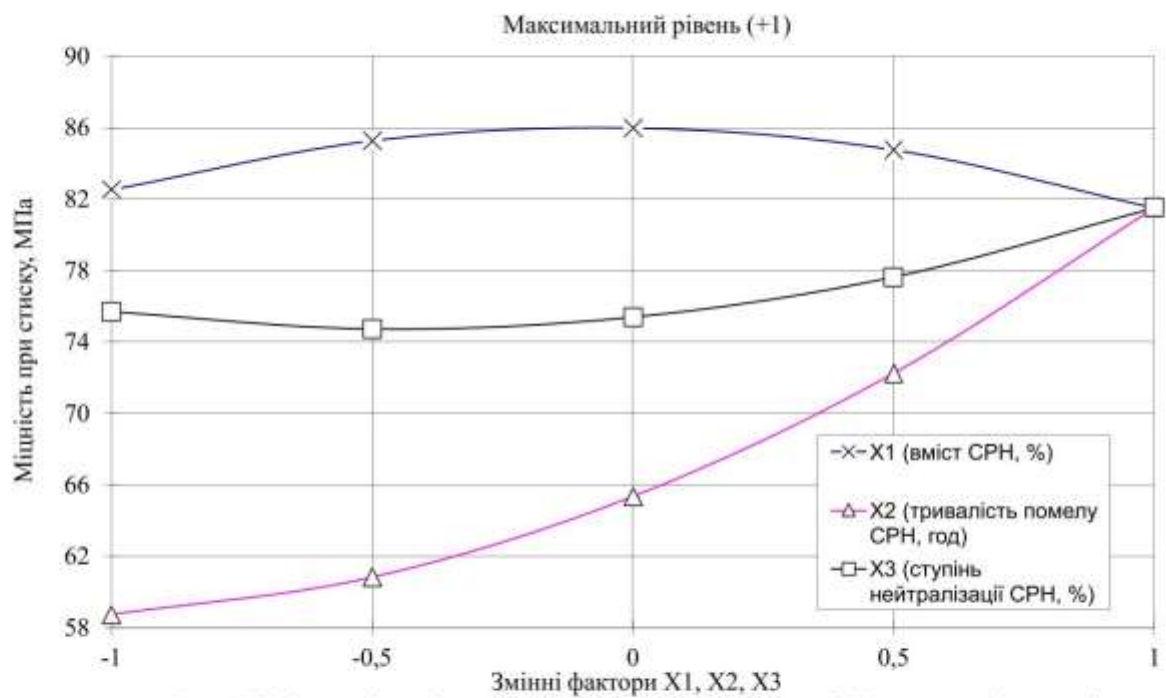


Рис. 5.13 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 7 добовому віці

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

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

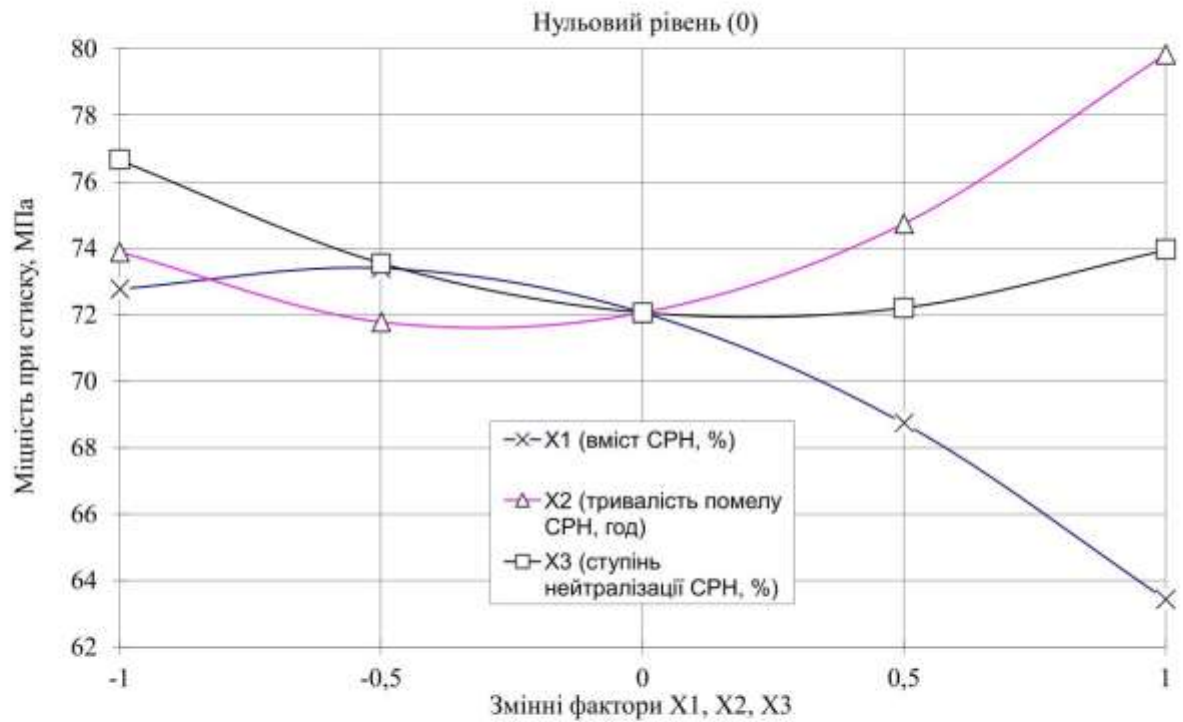


Рис. 5.14 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 7 добовому віці

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

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

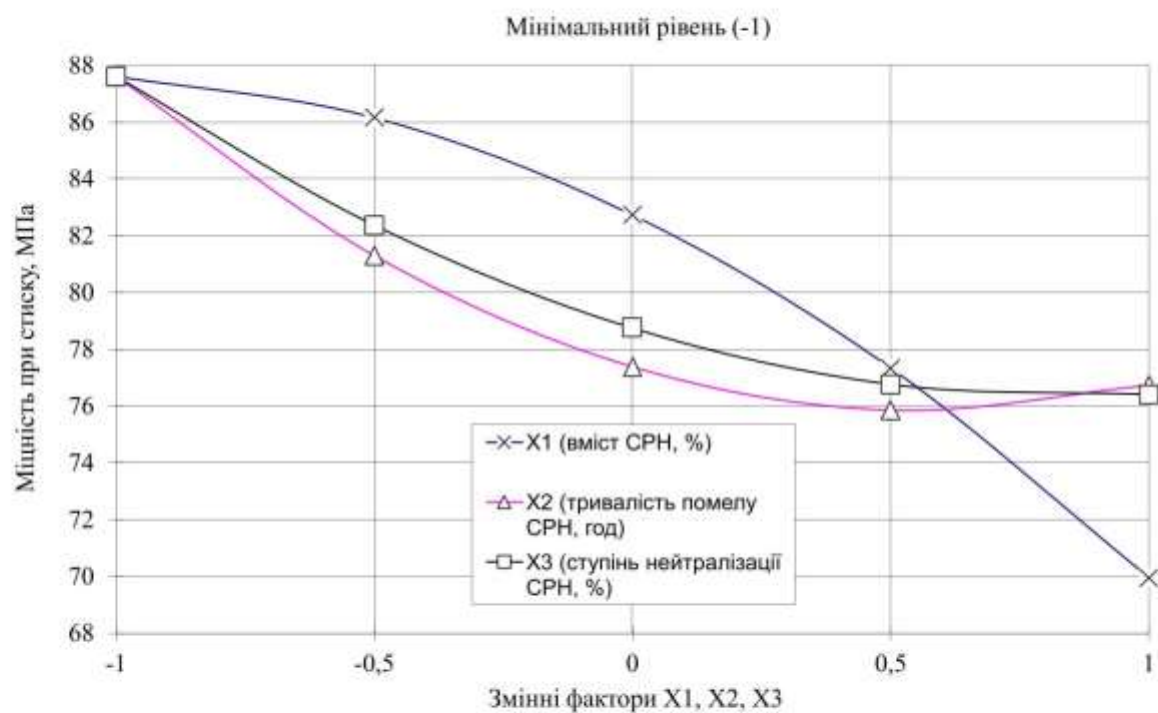


Рис. 5.15 Залежність міцності портландцементу від вмісту СРН, тривалості помелу і ступеня нейтралізації СРН в 7 добовому віці

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

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

### 5.2.5 Вплив мінеральної затравки на міцність цементу через 28 діб твердіння

Згідно математичного планування експерименту рівняння має вигляд:

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

Рис. 5.16, 5.17, 5.18 допомагають зрозуміти вплив змінних факторів на міцність цементу через 28 діб твердіння.

Аналіз графіків показує, що найбільший вплив на міцність портландцементу чинить вміст СРН і в меншій мірі – ступінь нейтралізації гідратованого цементу.

При знаходженні факторів на максимальному рівні, найбільша міцність ПЦ отримана при вмісті СРН – 4,5%, тривалості помелу СРН – 6 год, ступені нейтралізації гідратованого цементу – 90%.

При знаходженні факторів на середньому рівні, найбільша міцність цементу отримана при вмісті СРН – 3%, тривалості помелу СРН – 6 год.

При знаходженні факторів на мінімальному рівні, найбільша міцність ПЦ отримана при вмісті СРН – 1,5%, тривалості помелу СРН – 6 год, ступені нейтралізації – 30%.

Характеристики міцності одержаних зразків (термін твердіння – 28 діб) наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Характеристики міцності одержаних зразків  
Термін твердіння 28 діб

№ досл.	№ зразка	Розміри, см	Площа перерізу, см <sup>2</sup>	Руйнівне навантаження, кгс	Міцність при стиску	
					кгс/см <sup>2</sup>	МПа
1	1	3x3,1	9,3	10100	1086,0	110,8
	2	3x3	9,0	<del>7800</del>	-	-
	3	3x3	9,0	8750	972,2	99,2
Середнє значення		-	-	-	1029,1	105,0
2	1	3x3	9,0	7100	788,9	80,5
	2	2,9x3	8,7	6300	724,1	73,9
	3	2,9x3	8,7	<del>5800</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	756,5	77,2
3	1	3x3	9,0	<del>7500</del>	-	-
	2	3x3	9,0	7700	855,5	87,3
	3	3x3,1	9,3	9600	1032,2	105,3
Середнє значення		-	-	-	943,9	96,3
4	1	2,9x3,1	9,0	6750	750	76,5
	2	2,9x3	8,7	6500	747,1	76,2
	3	2,9x3,1	9,0	<del>6500</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	748,6	76,4
5	1	3,1x3	9,3	7750	833,3	85,0
	2	3x3,1	9,3	8050	865,6	88,3
	3	2,9x3,1	9,0	<del>5850</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	849,4	86,6
6	1	3x3	9,0	<del>7900</del>	-	-
	2	3x3,1	9,3	9000	967,7	98,7
	3	3x3,2	9,6	8550	890,6	90,9
Середнє значення		-	-	-	929,2	94,8

Продовження таблиці 5.6

№ досл.	№ зразка	Розміри, см	Площа перерізу, см <sup>2</sup>	Руйнівне навантаження, кгс	Міцність при стиску	
					кгс/см <sup>2</sup>	МПа
7	1	3x3,2	9,6	<del>4800</del>	-	-
	2	3x3,1	9,3	7300	784,9	80,1
	3	3,1x3,1	9,6	6750	703,1	71,7
Середнє значення		-	-	-	744,0	75,9
8	1	2,9x3,1	9,0	7000	777,8	79,3
	2	3x3	9,0	9750	1083,3	110,5
	3	3x3,2	9,6	<del>6800</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	930,5	94,9
9	1	3x3	9,0	6050	672,2	68,6
	2	3x3,1	9,3	<del>5750</del>	-	-
	3	3x3	9,0	6450	716,7	73,1
Середнє значення		-	-	-	694,4	70,8
10	1	3x3	9,0	8500	944,4	96,4
	2	3x3	9,0	<del>7750</del>	-	-
	3	2,9x3,1	9,0	8750	972,2	99,2
Середнє значення		-	-	-	958,3	97,8
11	1	2,9x3	8,7	9250	1063,2	108,4
	2	2,9x3	8,7	7300	839,1	85,6
	3	3x3,1	9,3	<del>7000</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	951,1	97,0
12	1	2,9x3,1	9,0	<del>7500</del>	-	-
	2	2,9x3,2	9,3	8800	946,2	96,6
	3	3x3	9,0	7800	866,7	88,4
Середнє значення		-	-	-	906,4	92,5

Продовження таблиці 5.6

№ досл.	№ зразка	Розміри, см	Площа перерізу, см <sup>2</sup>	Руйнівне навантаження, кгс	Міцність при стиску	
					кгс/см <sup>2</sup>	МПа
13	1	3x3	9,0	8500	944,4	96,3
	2	2,9x3,2	9,3	<del>7000</del>	-	-
	3	3x3	9,0	8000	888,9	90,7
Середнє значення		-	-	-	916,6	93,5
14	1	3,1x2,9	9,0	8300	922,2	94,1
	2	2,9x3,1	9,0	7750	861,1	87,9
	3	3,2x3	9,6	<del>7400</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	891,6	91,0
15	1	3,1x3	9,3	<del>5900</del>	-	-
	2	3x3	9,0	7500	833,3	85,0
	3	2,9x3,1	9,0	7750	861,1	87,8
Середнє значення		-	-	-	847,2	86,4
16	1	2,9x3,2	9,3	8200	881,7	90,0
	2	2,9x3,1	9,0	7850	872,2	89,0
	3	3x3	9,0	<del>7450</del>	-	-
Середнє значення		-	-	-	876,9	89,5
17	1	3x3	9,0	<del>7300</del>	-	-
	2	3,2x3	9,6	8100	843,8	86,1
	3	3x3	9,0	7750	861,1	87,8
Середнє значення		-	-	-	852,4	86,9

## 5.2.6 Середні значення міцності та терміни тужавлення

### портландцементу

Отже, зведені результати проведених випробувань наведені в табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Середні значення міцності та терміни тужавлення портландцементу у присутності комплексної добавки

№ досліджу	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Терміни тужавлення, год./хв.		Міцність, МПа			
				Поч.	Кін.	1 доба	2 доби	7 діб	28 діб
1	4,5	6	90	1 <sup>30</sup>	2 <sup>30</sup>	39,6	58,5	83,5	105
2	1,5	6	90	2 <sup>20</sup>	3 <sup>35</sup>	54,4	68,0	79,3	77,2
3	4,5	2	90	1 <sup>30</sup>	2 <sup>10</sup>	55,0	59,7	59,8	96,3
4	1,5	2	90	2 <sup>30</sup>	3 <sup>15</sup>	47,8	57,9	75,6	76,4
5	4,5	6	30	2 <sup>05</sup>	3 <sup>05</sup>	48,8	68,1	73,5	86,6
6	1,5	6	30	2 <sup>40</sup>	3 <sup>45</sup>	48,1	62,6	74,4	94,8
7	4,5	2	30	2 <sup>00</sup>	2 <sup>45</sup>	49,1	59,0	70,2	74,1
8	1,5	2	30	2 <sup>20</sup>	3 <sup>25</sup>	44,8	62,0	84,4	94,9
9	4,5	4	60	2 <sup>45</sup>	3 <sup>45</sup>	34,0	53,4	62,9	70,8
10	1,5	4	60	2 <sup>50</sup>	3 <sup>55</sup>	39,4	59,7	82,9	97,8
11	3	6	60	2 <sup>30</sup>	3 <sup>00</sup>	47,5	62,6	86,2	97,0
12	3	2	60	2 <sup>05</sup>	2 <sup>50</sup>	48,3	61,2	77,1	92,5
13	3	4	90	4 <sup>00</sup>	4 <sup>55</sup>	45,2	68,3	75,5	93,5
14	3	4	30	2 <sup>30</sup>	3 <sup>15</sup>	47,0	62,7	84,7	91,0
15	3	4	60	2 <sup>20</sup>	3 <sup>05</sup>	45,2	63,7	66,6	86,4
16	3	4	60	2 <sup>30</sup>	3 <sup>05</sup>	45,0	62,9	66,5	86,9
17	3	4	60	2 <sup>25</sup>	3 <sup>10</sup>	45,9	63,5	66,8	86,5
ПЦ без добавок				3 <sup>40</sup>	4 <sup>25</sup>	29,8	51,0	84,5	84,4

Результати експерименту графічно зображені та інтерпретовані за допомогою діаграми – динаміки зміни міцності зразків з цементу залежно від змінних факторів (рис. 5.19).

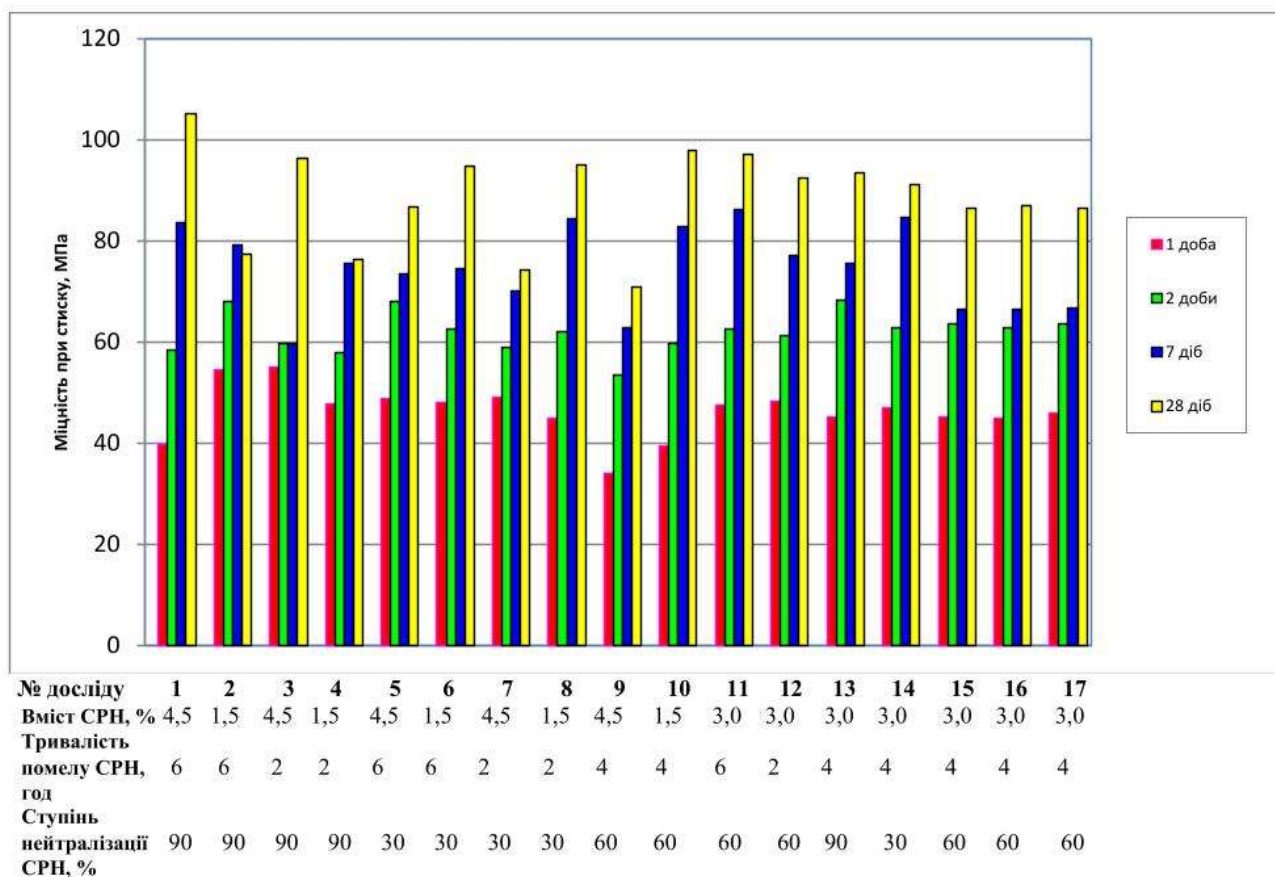


Рис. 5.19 Динаміка зміни міцності зразків з цементу залежно від змінних факторів експерименту

Аналіз одержаних результатів показує, що терміни тужавлення в усіх випадках скорочується порівняно із бездобавочним цементом, але це, на нашу думку, – вплив хімічних речовин, а не СРН. Більша ступінь нейтралізації при вищому вмісті затравки вводить у систему більшу кількість хлориду кальцію, це й приводить до скорочення термінів тужавлення.

Вплив мінеральної затравки на міцність цементного каменю більш суттєвий. Вже в першу добу міцність порівняно із бездобавочними цементом складає від 150 до 180%. Залежність швидкості наростання міцності від ступеню нейтралізації не суттєва, хоча різко змінюються в системах концентрації  $\text{CaCl}_2$  і  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

З літературних джерел відомо, що гідроксид кальцію не впливає безпосередньо на ближню коагуляцію цементного гелю, так як із збільшенням кількості  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при повторних замішуваннях реагуючого цементу терміни

тужавлення повинні прискоритися, а цього не відбувається [15]. Концентрація іонів вапна в дифузних шарах досягає максимуму ще задовго до початку тужавлення у зв'язку малої його розчинності у воді, тому  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  не може відігравати визначну роль у процесі, що розглядається [9], з іншого боку, існують повідомлення [16], що  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  відіграє значну роль у гідролізі аліту. Якщо ступінь гідратації  $\text{C}_3\text{S}$  у воді становить 26,5% то в розчині  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – 49,5%, тобто відносна зміна ступеню гідратації  $\text{C}_3\text{S}$  може бути і при насиченні рідкої фази оксидами, що входять в склад самого цементу.

У цьому зв'язку прискорення твердіння цементу у першу добу можна віднести як до збільшення кількості  $\text{CaCl}_2$ , так й до наявності гідроксиду кальцію.

Динаміка зміни міцності у наступні терміни дещо змінюється. Швидкість зростання міцності гальмується в зразках з високою однодобовою міцністю і, навпаки, прискорюється там де у першу добу була досить низькою. Це можна пояснити тим, що при швидкому структуроутворенні виникає структура з дефектами, яка з часом поступово упорядковується.

У 7 добовому віці міцності зразків більш-менш вирівнюються, а через 28 діб твердіння спостерігається дуже високі міцності у деяких зразках, особливо при ступені нейтралізації добавки 60 і 90%.

Як вже зазначалось, збільшення ступеню нейтралізації викликає збільшення кількості  $\text{CaCl}_2$  у твердіючій системі, а це небезпечно з точки зору корозії арматури. Тому доцільно рекомендувати наступні технічні характеристики затравки (СРН): вміст від маси цементу – 3,0%; тривалість мокрого помелу – 4-6 год; ступінь нейтралізації заздалегідь гідратованого цементу – 60%.

### **5.3 Визначення температури твердіння цементного тіста при екзотермічних процесах**

Тепловиділення або екзотермія бетону є наслідком гідратації структуроутворення цементного каменю. Гідратація цементу

супроводжується виділенням тепла, що може бути встановлено по зміні температури цементного тіста за допомогою спеціалізовано виготовленого “приладу-термосу”.

#### *Постановка задачі*

Роль ранніх стадій твердіння цементів в забезпеченні необхідних властивостей бетонів різного призначення велика. У цей період з найбільшою швидкістю та інтенсивністю відбуваються основні реакції гідrataції клінкерних мінералів, формується структура цементного каменю і контактна зона із заповнювачем, розвиваються явища, які супроводжують твердіння, – тепловиділення, контракція, усадка тощо [1].

Усе це зумовлює необхідність поглибленого вивчення процесів твердіння на ранніх стадіях залежно від багатьох рецептурних, технологічних та кліматичних чинників з метою визначення можливостей забезпечення заданих властивостей бетонів.

#### *Аналіз досліджень*

Одним із головних наслідків процесів твердіння цементу в бетоні є тепловиділення (екзотермія). Тепловиділення – інтегральний вираз елементарних реакцій: змочування, хімічних реакцій, кристалізації новоутворень тощо.

Для цементів, які тверднуть, тепловиділення має екзотермічний характер. Його прийнято характеризувати двома показниками – швидкістю й повнотою, які залежать від багатьох чинників. Найважливіші з них: хімічний і мінеральний склад цементів, склад бетону, вид і концентрація домішок, які вводяться, масивність виробів і конструкцій, температура довкілля тощо.

Дослідження дали змогу встановити, що формування власного термонапруженого стану в бетонних виробках і конструкціях викликане особливостями структуроутворення в матеріалі за наявності температурних впливів.

Час формування температурної кривої нульових напружень може визначатися за часом утворення просторової кристалізаційної структури із гідросилікатів кальцію в шарі з найбільшим відставанням процесу гідратації.

Час утворення просторової кристалізації структури із гідросилікатів кальцію може бути визначений за часом найбільшої інтенсивності тепловиділення цементу за його гідратації.

Взаємозв'язок інтенсивності тепловиділення із структуроутворенням був підтверджений дослідженнями процесів екзотермії цементу в термосному калориметрі і виконанням робіт за допомогою електронного мікроскопа [35].

Склад цементу значно впливає на процеси гідратації і тепловиділення, причому істотна (значна) роль відводиться основності цементів, пониження якої приводить до підвищення температурної сприйнятливості.

Отримані показники температур твердіння цементного тіста наведено у табличній формі (таблиця 5.8). На основі цих результатів побудовано графіки впливу змінних факторів експерименту на температуру твердіння цементу при екзотермічних процесах (рис. 5.20, рис. 5.21).

Отже може зробити висновок, що зі зростанням температури твердіння закономірно зростає інтенсивність і повнота перебігу реакцій гідратації для усіх цементів, які досліджувались.

Особливої різниці впливу вмісту СРН, тривалості помелу гідратованого цементу та ступеня нейтралізації СРН на температури твердіння не виявлено. Помітно, що у всіх дослідах температура поступово підвищується на 3-4°C, досягає максимуму приблизно на 10, 11, 12 годинах твердіння, після чого іде на спад. Максимальні значення температур (55°C) отримано у дослідах №10, 11, 12 на 10 та 11 годинах тужавлення.

Вивчення тепловиділення при гідратації портландцементу різноманітного мінералогічного складу підтвердило, що найбільш термічними мінералами в цементі являються  $C_3S$  і  $C_3A$ , причому  $C_4AF$  уповільнює тепловиділення інших мінералів.

Слід відмітити, що тепловиділення портландцементу знаходиться в прямій залежності від швидкості його гідратації. Тому підвищення питомої поверхні цементу, застосування добавок-прискорювачів твердіння сприяють прискоренню тепловиділення. Відразу після змішування порошку цементу водою починається виділення теплоти, котре спочатку зменшується, потім знову починає зростати у відповідності з переривчастим характером гідратації портландцементу.

## РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

### 6.1. Бетонні роботи

Під час приготування, подавання, укладання і догляду за бетоном та будівельним розчином заготовлення, монтажу арматури, а також монтажу та демонтажу опалубки повинні бути вжиті заходи із запобігання впливу на працюючих таких небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

- розташування робочих місць поблизу перепаду по висоті до 1,3 м і більше;
- машини, що рухаються, та предмети, що ними переміщуються;
- обвалення елементів будівельних конструкцій і опалубки;
- підвищена температура арматури (під час виконання робіт із попереднього термонапруження арматури);
- шум і вібрація, недостатня освітленість робочого місця;
- несприятливі метеорологічні умови;
- підвищена напруга в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини.

За наявності попередньо зазначених небезпечних і шкідливих виробничих факторів, безпека виконання бетонних робіт повинна бути забезпечена відповідно до вимог проектно-технологічної документації. Одночасно необхідно визначити:

- небезпечні зони та засоби їх позначення (огорожі);
- безпечні засоби механізації для приготування, транспортування, подавання та укладання бетону;
- несучу здатність, міцність та стійкість опалубки, послідовність її монтажу та демонтажу;
- послідовність монтажу арматури;
- заходи та засоби забезпечення безпеки робочих місць на висоті;
- заходи та засоби безпеки праці під час догляду за бетоном у теплу та холодну пори року.

Цемент для виконання бетонних робіт необхідно зберігати в силосах, бункерах, ларях, інших закритих ємностях, запобігаючи розпиленню під час завантаження і вивантаження. Завантажувальні отвори повинні бути закриті захисними ґратами, а ґрати закриті на замок.

Під час використання пари для прогрівання заповнювачів, що знаходяться в бункерах або інших ємностях, необхідно вживати заходів для запобігання проникненню пари в робочі приміщення.

Спускання робітників у камери, що обігріваються парою, допускається після відключення подачі пари, охолодження камери і розташованих в ній матеріалів та виробів до температури плюс 40 °С.

## **6.2. Порядок виконання робіт**

Перед початком бетонних робіт керівник зобов'язаний:

- перевірити стійкість, міцність, справність риштувань, конструкцій опалубки, огорож робочих горизонтів;
- перевірити справність тари, бункерів, бетононасосів, маніпуляторів; - забезпечити працівників необхідними засобами індивідуального захисту.

Робота змішувальних машин повинна здійснюватися з дотриманням таких вимог:

- очищення прямиків для завантажувальних ковшів повинно здійснювати після надійного закріплення ковша в піднятому положенні;
- очищення барабанів і корит змішувальних машин дозволяється тільки після зупинки машини і зняття напруги.

Під час заготівлі арматури необхідно:

- огороджувати місця, призначені для розмотування бухт (мотків) і виправлення арматури;
- під час різання верстатами стрижнів арматури на відрізки довжиною менше ніж 30 см застосовувати пристрої, що запобігають їх розлітання;
- огороджувати робоче місце під час обробки стрижнів арматури, що виступають за габарити верстака, а у разі використання двобічних верстаків,

крім цього, розділяти верстак посередині поздовжньою металевою запобіжною сіткою висотою не менше ніж 1 м;

- складати заготовлену арматуру в спеціально відведені для цього місця;

- закривати щитами торцеві частини стрижнів арматури в місцях загальних проходів, які повинні бути завширшки не менше ніж 1,0 м.

Стропування арматурних стрижнів або каркасів під час переміщення їх вантажопідіймальними кранами повинні здійснювати стропальники.

Складати арматурні каркаси вертикальних конструкцій (колон, стінової огорожі тощо) необхідно з робочих настилів шириною не менше ніж 0,8 м, що мають захисну огорожу.

Відстань між настилами по висоті повинна бути не більше ніж 2,0 м.

Під час виконання робіт на висоті робоче місце арматурника повинно бути огорожено. Якщо неможливо встановити огорожу, а також якщо нахил робочої поверхні більше ніж 20°, працівники повинні користуватись запобіжними поясами і страхувальними канатами, місця закріплення яких визначаються у технологічних картах.

Під час зварювання арматури у закритих приміщеннях робочі місця зварювальників повинні бути відділені від суміжних робочих місць і проходів переносними ширмами з незаймистих матеріалів.

Елементи каркасів арматури необхідно пакетувати з урахуванням умов їх піднімання, складування і транспортування до місця монтажу.

Доступ робітників на встановлені арматурні та арматурноопалубні блоки до повного їх закріплення забороняється.

Ходіння по укладеній арматурі допускається тільки по спеціальних настилах завширшки не менше ніж 0,6 м, закріплених на арматурному каркасі.

Арматурні випуски з плит за їх висоти над рівнем бетону до 1,0 м повинні бути захищені (наприклад, гофрованою пластмасовою трубкою).

Установлення підкладок чи фіксаторів захисного шару під виготовлені арматурні сітки необхідно виконувати з використанням подовжувачів.

Під час проектування технології будівництва монолітних, каркасно-монолітних будівель і споруд необхідно передбачати відставання зведення конструкцій сходових кліток не більше ніж на один поверх. Методи піднімання працівників на робочі горизонти повинні бути визначені в ПВР.

Опалубка для зведення вертикальних елементів будівель і споруд повинна бути жорстко закріплена на робочому горизонті. Опалубка повинна бути облаштована елементами (площадки, драбини тощо), використання яких забезпечує безпечне піднімання працівників на позначки робочих місць.

Методи захисту від падіння з висоти працівників, елементів опалубки під час її улаштування та розбирання повинні бути передбачені в технологічних картах на виконання бетонних робіт.

Переміщення завантаженого або порожнього бункера для бетону дозволяється тільки, якщо затвор зачинено.

Під час укладання бетону з бункера відстань між нижнім краєм бункера та раніше покладеним бетоном або поверхнею, на яку укладається бетон, повинна бути не більше ніж 1,0 м, якщо інші відстані не передбачені ПВР.

Подавання бетонної суміші за допомогою бетононасоса за відсутності надійної сигналізації між оператором і робітниками, які укладають бетон, забороняється.

Перед включенням бетононасоса повинна бути перевірена надійність роботи замкових з'єднань і ввімкнута сигналізація.

Перед початком укладання бетонної суміші віброхоботом повинна бути перевірена справність та надійність закріплення всіх його ланок між собою і до страхувального каната.

Під час подавання бетону до місця його укладання бетононасосами необхідно забезпечити вільний доступ до стаціонарних вертикальних стояків бетоноводів.

Здійснювати монтаж і демонтаж бетоноводів дозволяється тільки після зниження тиску у бетоноводі до атмосферного.

Під час подавання бетону за допомогою бетононасоса необхідно:

- відводити всіх працюючих від бетоноводу на час його продування на відстань не менше ніж 10 м;

- укладати бетоноводи на прокладки для зменшення впливу динамічного навантаження на арматурний каркас і опалубку під час подавання бетону.

Видалення пробки з бетоноводу стисненим повітрям допускається за умов:

- наявності захисного щита вихідного отвору бетоноводу;
- перебування працюючих на відстані не менше ніж 10 м від вихідного отвору бетоноводу;
- рівномірного без перевищення допустимого тиску подавання повітря до бетоноводу.

За неможливості видалення пробки необхідно скинути тиск у бетоноводі, простукуванням знайти місце, де знаходиться пробка в бетоноводі, роз'єднати бетоновід і видалити пробку чи замінити засмічену ланку.

Здійснювати ремонт, монтаж, демонтаж, перевірку надійності швидкознімальних з'єднань ланок бетоноводу або їх заміну під час роботи бетононасоса заборонено.

Улаштування елементів опалубки у кілька ярусів допускається у разі, якщо це передбачено інструкцією з експлуатації опалубки заводу-виробника.

Розбирати опалубку з дозволу керівника робіт допускається після досягнення бетоном не менше 70 % міцності, що визначена проектною документацією конструкції.

Під час розбирання опалубки повинні бути вжиті заходи з унеможливлення випадкового падіння працюючих, елементів опалубки, обвалення підтримувальних риштувань і конструкцій.

Монтаж, демонтаж, експлуатацію самопіднімальної опалубки необхідно виконувати згідно з інструкцією організації-виробника.

Під час пересування секцій ковзної опалубки та пересувних риштувань повинні бути вжиті заходи, що забезпечують безпеку працюючих. Особам, що

Після кожного переміщення електрообладнання, що застосовувалось під час прогрівання бетону, на нове місце необхідно візуально проконтролювати стан мережі живлення та інструментально виміряти опір ізоляції.

Забороняється виконання бетонних робіт з риштовань, площадок тощо під час грози, ожеледі, туману і за швидкості вітру 12 м/с і більше.

Під час свердління алмазними кільцевими свердлами технологічних отворів для монтажу трубопроводів у бетонних і залізобетонних конструкціях на місці очікуваного падіння керна повинна бути відгороджена небезпечна зона.

Під час експлуатації на будівельному об'єкті маніпулятора з гідравлічним приводом стріли-розподільника заборонено:

- перебувати у небезпечній зоні в радіусі 4 м від місця розташування розподільного шланга або безпосередньо під стрілою-розподільником бетону;

- виконувати роботи маніпулятором у межах охоронних зон діючих ЛЕП, а також на відстані елементів маніпулятора (за винятком розподільного шланга) від будівельних конструкцій менше ніж 1,0 м;

- експлуатувати маніпулятор за мінусової зовнішньої температури, а також під час перевищення швидкості вітру, зазначеної в паспорті заводу-виробника маніпулятора;

- виконувати виробничі операції з гідроманіпулятором із зусиллями, що не передбаченні інструкцією з його експлуатації.

До роботи з маніпулятором допускаються особи, що пройшли спеціальне навчання та відповідний інструктаж із безпечного ведення робіт.

### **6.3. Організація робочих місць**

Під час бетонування перекриттів опалубку необхідно огородити вздовж всього периметру. Всі отвори в робочій підлозі опалубки повинні бути закриті щитами. Якщо необхідно, щоб отвори були постійно відкритими, вони повинні бути закриті ґратами.

Місця розташування опор стояків опалубки перекриттів повинні бути огорожені та позначені заборонними знаками безпеки з пояснювальними написами. Вхід (прохід) під час виконання бетонних робіт в (через) цю зону заборонено.

Перед монтажем збірної опалубки стін, колон, пілонів, що розташовані на краю перекриття, ригелів, склепінь у випадках, коли монтажник під час виконання робіт перебуває не на робочій підлозі опалубки, повинні бути улаштовані робочі настили завширшки не менше ніж 0,8 м із захисними суцільними огорожами, конструкція яких повинна бути розрахована на можливі технологічні навантаження і бути визначена у ПВР.

Після зняття частини ковзної опалубки та підвісних риштувань торцеві сторони опалубки необхідно огородити.

Для захисту працівників, що виконують роботи на підвісних риштуваннях, від предметів, що можуть падати зверху, по зовнішньому периметру ковзної опалубки повинні бути обладнані козирки шириною не менше ніж ширина риштувань.

Вантажно-розвантажувальні роботи, знімні вантажозахоплювальні пристрої, стропи і тара, призначені для подавання бетонної суміші вантажопідіймальними кранами, повинні відповідати вимогам розділу 8 цих Норм та НПАОП 0.00-1.01.

На ділянках натягання арматури в місцях, де можуть проходити люди, повинна бути встановлена захисна огорожа висотою не менше ніж 1,8 м.

Пристрої для натягування арматури повинні бути обладнані сигналізацією, що приводиться у дію під час включення приводу натяжного пристрою. Забороняється перебування людей на відстані ближче ніж 1,0 м від арматурних стрижнів, що нагріваються електрострумом.

Заготівлю та складання укрупнених арматурних каркасів необхідно виконувати у спеціально призначених для цього місцях.

Під час застосування бетонних сумішей з хімічними добавками необхідно використовувати захисні рукавички й окуляри.

Естакада для подавання бетонної суміші автосамоскидами повинна бути обладнана відбійними брусами. Між відбійними брусами й огорожами повинні бути передбачені проходи завширшки не менше ніж 0,6 м. На тупикових естакадах повинні бути встановлені поперечні відбійні бруси.

Під час вивільнення кузовів автосамоскидів від залишків бетонної суміші працівникам забороняється перебувати в/на кузові транспортного засобу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Баженов Ю. М. Технологія бетону (укр. переклад). – К. : Вища школа, 2012. – 496 с.
2. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Будівельне матеріалознавство. – Рівне : НУВГП, 2013. – 448 с.
3. Дворкін Л. Й. Бетони і розчини на основі мінеральних в'язучих. – Рівне : НУВГП, 2011. – 400 с.
4. Дворкін Л. Й. Технологія бетону. – Рівне : НУВГП, 2011. – 360 с.
5. Дворкін Л. Й. Добавки до бетонів і будівельних розчинів. – Рівне : НУВГП, 2014. – 312 с.
6. Дворкін Л. Й. Спеціальні бетони. – Рівне : НУВГП, 2012. – 320 с.
7. Гоц В. І. Бетони і будівельні розчини. – К. : КНУБА, 2016. – 568 с.
8. Кривенко П. В. Будівельне матеріалознавство. – К. : ЕксОб, 2006. – 704 с.
9. Пługін А. А. Фізико-хімічні основи тверднення в'язучих речовин. – Харків : УкрДУЗТ, 2014. – 280 с.
10. Пługін А. А., Пługін О. А. Модифікація цементних систем. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – 250 с.
11. Пługін О. А. Хімія цементу. – Харків, 2016. – 250 с.
12. Іщенко А. А. Технологія бетонних і залізобетонних конструкцій. – К. : Основа, 2016. – 350 с.
13. Ковальчук В. П. Будівельні матеріали. – Львів : Львівська політехніка, 2018. – 384 с.
14. Онищенко В. О. Довговічність бетонних конструкцій. – К. : Ліра-К, 2018. – 280 с.
15. Семко О. В. Сучасні будівельні матеріали. – Полтава : ПНТУ, 2020. – 300 с.
16. Шишкін О. О. Модифіковані бетони підвищеної довговічності. – Кривий Ріг, 2018. – 280 с.

17. Пшінько О. М. Будівельні матеріали і вироби. – Дніпро : НГУ, 2017. – 350 с.
18. Бабич Є. М. Будівельні матеріали. – К. : КНУБА, 2017. – 400 с.
19. ДСТУ Б В.2.7-171:2008. Добавки для бетонів і розчинів. Загальні технічні умови.
20. ДСТУ Б В.2.7-69:2011. Добавки для бетонів. Класифікація.
21. ДСТУ Б EN 934-2:2019. Добавки для бетону.
22. ДСТУ Б В.2.7-185:2009. Цементи. Методи визначення властивостей.
23. ДСТУ Б EN 196-1:2015. Методи випробування цементу.
24. ДСТУ Б EN 197-1:2015. Цемент. Склад і вимоги.
25. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Цементи загальнобудівельного призначення.
26. ДСТУ Б EN 1008:2014. Вода для бетонів і розчинів.
27. ДСТУ ISO 3696:2003. Вода для лабораторій.
28. ДСТУ Б EN 206:2019. Бетон. Вимоги, властивості, виробництво.
29. ДСТУ Б EN 12390-3:2018. Міцність бетону на стиск.
30. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Методи визначення міцності бетону.
31. ДСТУ Б EN 12620:2013. Заповнювачі для бетону.
32. ДСТУ Б EN 13139:2013. Заповнювачі для розчинів.
33. ДСТУ-Н Б EN 13670:2013. Виконання бетонних конструкцій.
34. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції.
35. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Захист бетонних конструкцій від корозії.

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет  
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Навчально – науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою  
Кафедра будівництва та цивільної інженерії

**Графічні та табличні матеріали до дипломної роботи**

**«Дослідження впливу добавок прискорювачів  
твердіння на міцність бетону для захисних споруд»**

Виконав:

П.М. Красовський

Керівник:

О.М. Гукасян

Завідувач кафедри:

О.В. Семко

Рецензент:

Ю.О. Побуховська

Полтава 2025

## ВИСНОВКИ ДО ОГЛЯДУ ЛІТЕРАТУРИ

1. Основними напрямками технічного прогресу в технології бетонних робіт є: прискорення твердіння бетону, зменшення витрат цементу, зниження енерговитрат, підвищення довговічності конструкцій. Одним із шляхів розв'язання цих задач є використання добавок в бетон.

2. Застосування добавок є найбільш ефективним способом, що підвищує якість бетонів та не вимагає великих капітальних затрат. Грамотне застосування цільових комплексних добавок дозволяє вирішити будь-які проблеми, пов'язані з отриманням бетонів із заданими властивостями.

Як правило, вони двокомпонентні. Завдяки певним комбінаціям бетонні заводи отримують високоміцні бетони з унікальними характеристиками. Адже, одні й ті ж добавки залежно від їх кількості і мінералогічного складу цементу діють по різному.

3. Процес твердіння цементу можна підвищити введенням невеликої кількості мінеральної "затравки" – високодисперсних речовин.

Затравки підвищують міцність із 0,5 до 14,0-18,5 МПа через 10 годин твердіння, із 60,0 до 70,0-80,0 МПа через 28 діб. Можливо, часточки тонкомеленого цементу діють як центри кристалізації, тому в тісті спрощується виникнення гідратних фаз і прискорюється гідратація.

4. Хлориди, нітрати, нітроти, розчинні сульфати і карбонати широко використовуються, мають позитивний ефект, але їх дія залежить від концентрації добавок, мінерального складу цементу, періоду твердіння цементу. Найбільш відомий – хлорид кальцію. Сприяє збільшенню міцності в усі терміни твердіння, але хлорид-іони агресивні відносно арматури залізобетону. Нітрати є інгібіторами корозії арматури однак зменшують швидкість гідратації двокальцієвого силікату.

5. Щоб збільшити швидкість твердіння цементу необхідно підвищити розчинність клінкерних мінералів по кремнезему і по вапну, а такий характер розчинності забезпечує комплексна добавка із сульфатів і хлоридів.

Введення комплексу солей хлориду кальцію і нітриту натрію дозволяє практично повністю виключити корозію арматури й підвищити ефект збільшення міцності, досягнутий введенням хлориду кальцію. Тому може бути доцільним використанням комплексної добавки із хлориду кальцію, сульфату натрію і нітриту натрію.

## МЕТА РОБОТИ

**Мета і задачі дослідження.** Основна мета роботи – дослідити вплив тонкості помелу мінеральної «затравки» на швидкість набору міцності.

**Об'єкт дослідження** – дослідження впливу дії комплексної добавки на механічні характеристики бетонів.

**Предмет дослідження** – важкий бетон з додаванням добавок.

## ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### Основні задачі дослідження:

1. Підібрати раціональний склад комплексної хімічної добавки.

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

Дослідити вплив тонкості помелу мінеральної затравки на швидкість набору міцності.

3. Дослідження динаміки зміни міцності зразків залежно від змінних факторів експерименту.

4. Провести аналіз впливу добавок на тепловиділення при твердінні цементу.

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

№ досліду	Рівні змінних факторів		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
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 за допомогою 3х факторного експерименту

X<sub>1</sub> – вміст добавки%: 1,5; 3,0; 4,5;

X<sub>2</sub> – тривалість помелу, год: 2; 4; 6;

X<sub>3</sub> – ступінь нейтралізації, %: 30; 60; 90.

## ПРИЛАД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГІДРАТАЦІЇ ЦЕМЕНТНОГО ТІСТА 6



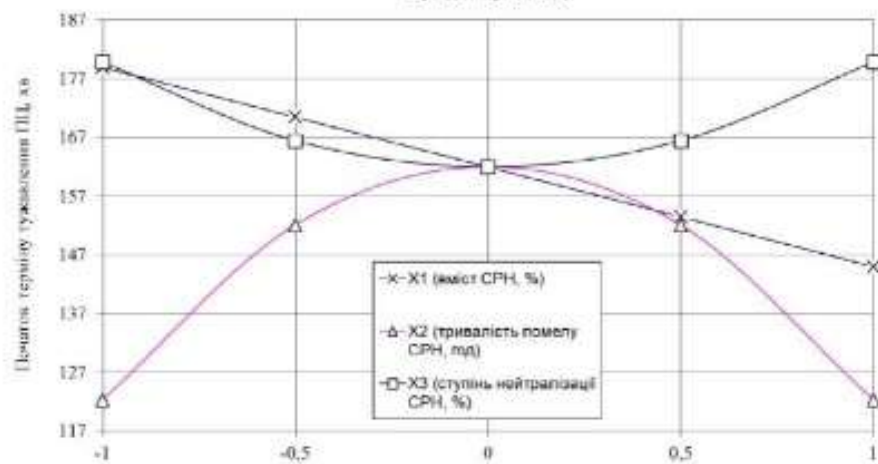
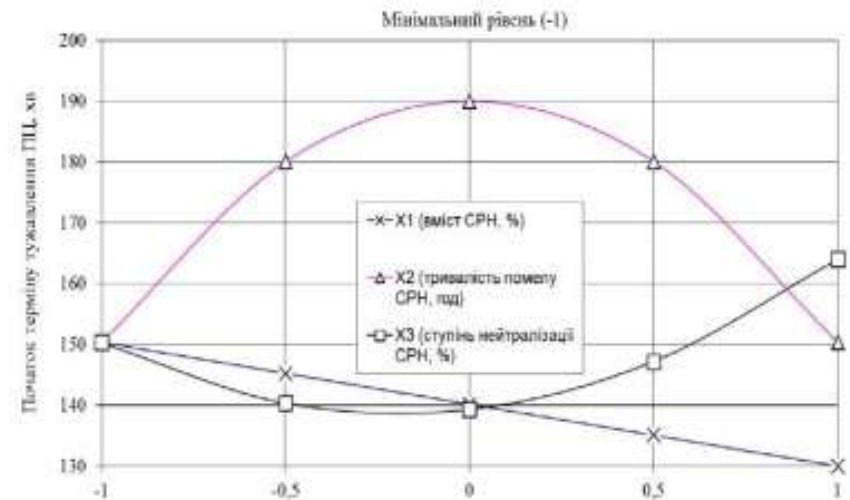
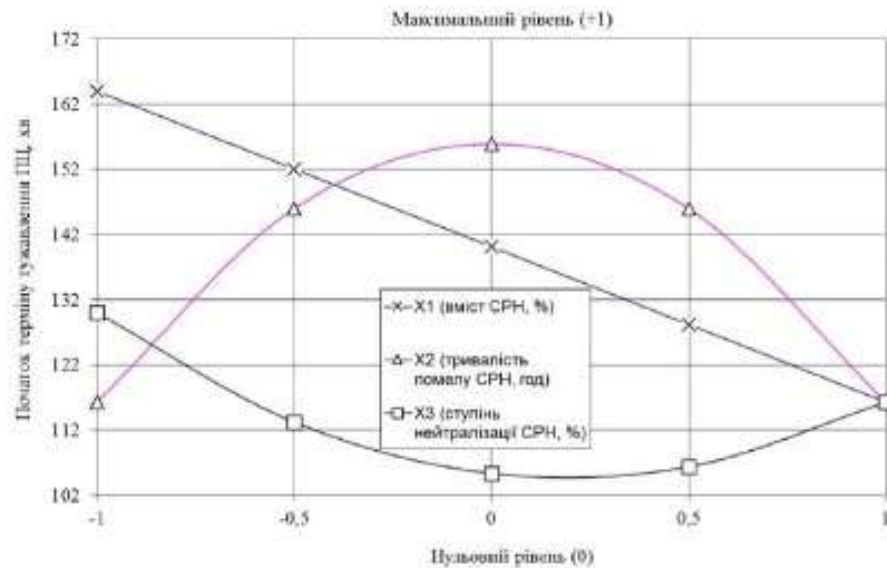
Прилад для визначення екзотермічних процесів одержаних зразків. Вигляд зверху

# ВПЛИВ ХІМІЧНИХ ДОБАВОК НА ТЕРМІНИ ТУЖАВЛЕННЯ І МІЦНІСТЬ ЗАТВЕРДІЛОГО ЦЕМЕНТУ

7

№ 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 <sup>15</sup>	4 <sup>30</sup>	33,7	57,8	76,6
2	CaCl <sub>2</sub>	1 <sup>30</sup>	2 <sup>15</sup>	45,7	69,1	86,6
3	FeCl <sub>3</sub>	1 <sup>25</sup>	2 <sup>40</sup>	30,5	50,6	100,6
8	CPH	2 <sup>00</sup>	2 <sup>50</sup>	43,7	68,1	83,0
9	CPH + C-3	4 <sup>15</sup>	4 <sup>40</sup>	43,5	53,4	88,7
10	CaCl <sub>2</sub> + NaNO <sub>2</sub>	2 <sup>00</sup>	2 <sup>45</sup>	51,7	69,0	82,4
11	CaCl <sub>2</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2 <sup>05</sup>	4 <sup>35</sup>	42,5	72,9	99,3
13	CaCl <sub>2</sub> + C-3	3 <sup>05</sup>	5 <sup>50</sup>	44,1	61,2	97,1
14	CaCl <sub>2</sub> + CPH	1 <sup>30</sup>	2 <sup>00</sup>	44,6	71,7	119,9
16	NaNO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3 <sup>25</sup>	4 <sup>25</sup>	44,5	74,9	100,9
18	NaNO <sub>2</sub> + CPH	2 <sup>35</sup>	3 <sup>45</sup>	36,6	73,4	95,2
23	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + CPH	3 <sup>00</sup>	4 <sup>05</sup>	36,2	42,1	91,0
24	CaCl <sub>2</sub> + CPH + C-3	3 <sup>00</sup>	3 <sup>30</sup>	40,0	53,9	80,2
26	CaCl <sub>2</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + C-3	0 <sup>20</sup>	0 <sup>30</sup>	46,9	70,6	78,3
30	CaCl <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + CPH	2 <sup>20</sup>	4 <sup>15</sup>	51,5	67,8	82,4
31	NaNO <sub>2</sub> + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + C-3	1 <sup>25</sup>	1 <sup>35</sup>	31,5	59,5	89,4
37	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + C-3	0 <sup>40</sup>	0 <sup>50</sup>	44,0	50,3	83,6
40	CaCl <sub>2</sub> + NaNO <sub>2</sub> + C-3 + CPH	1 <sup>55</sup>	2 <sup>45</sup>	51,8	61,3	96,3
42	CaCl <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + C-3 + CPH	2 <sup>35</sup>	4 <sup>20</sup>	43,7	62,7	79,0
43	NaNO <sub>2</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + C-3 + CPH	2 <sup>20</sup>	4 <sup>40</sup>	38,1	49,9	82,9

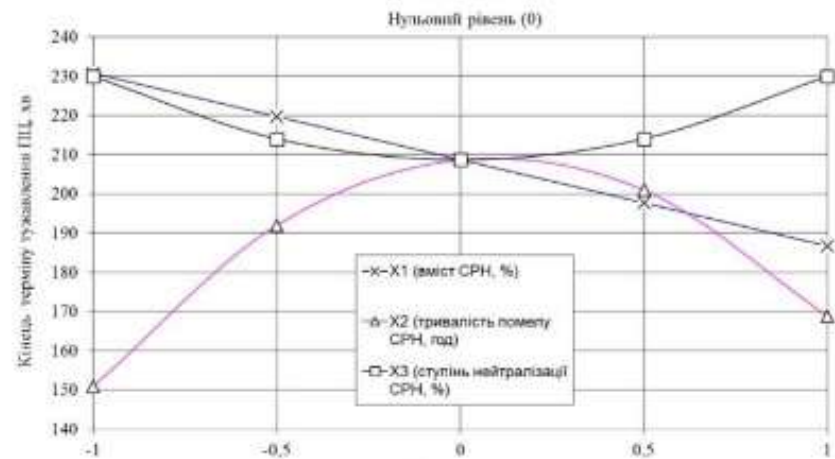
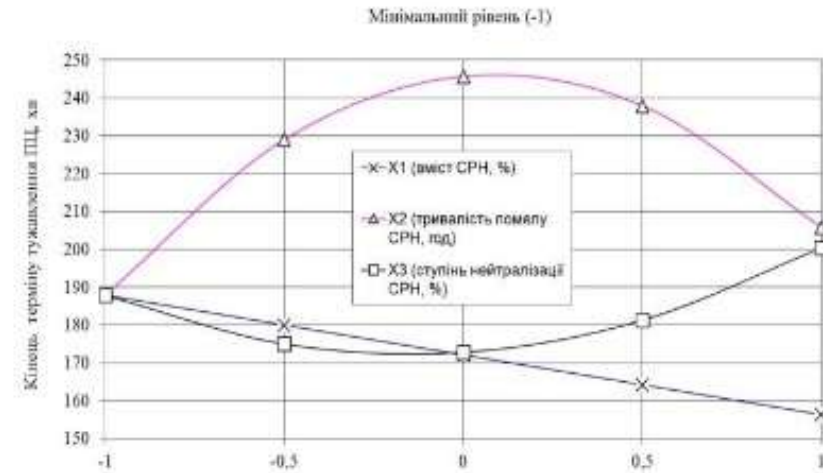
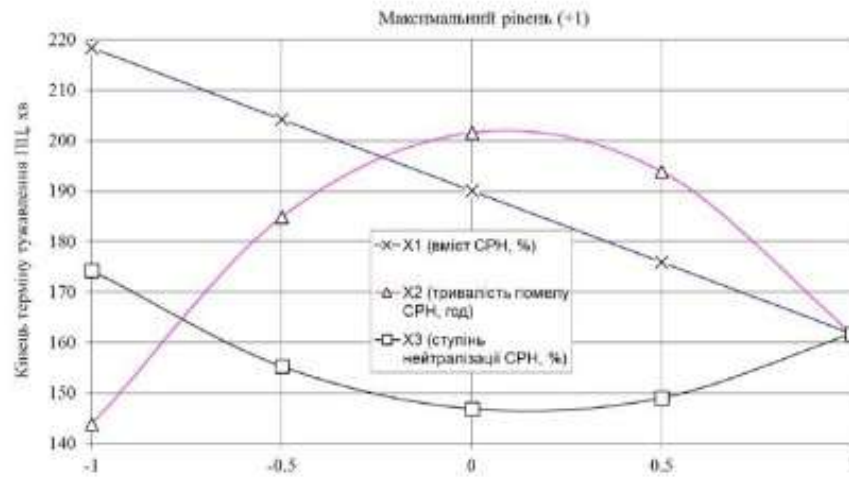
# РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНІВ ТУЖАВІННЯ



Залежність початку термінів тужавлення від вмісту, тривалості помелу, ступеня нейтралізації

# ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗРАЗКІВ В ВІЦІ ОДНА ДОБА

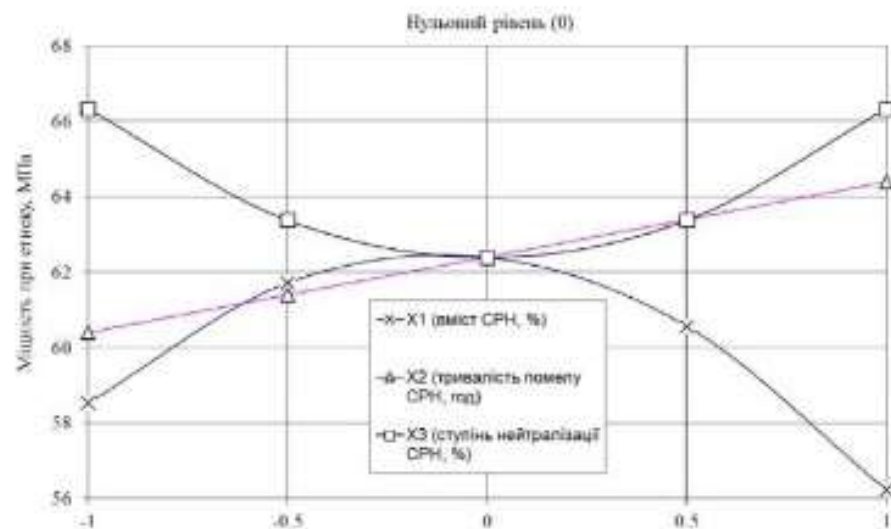
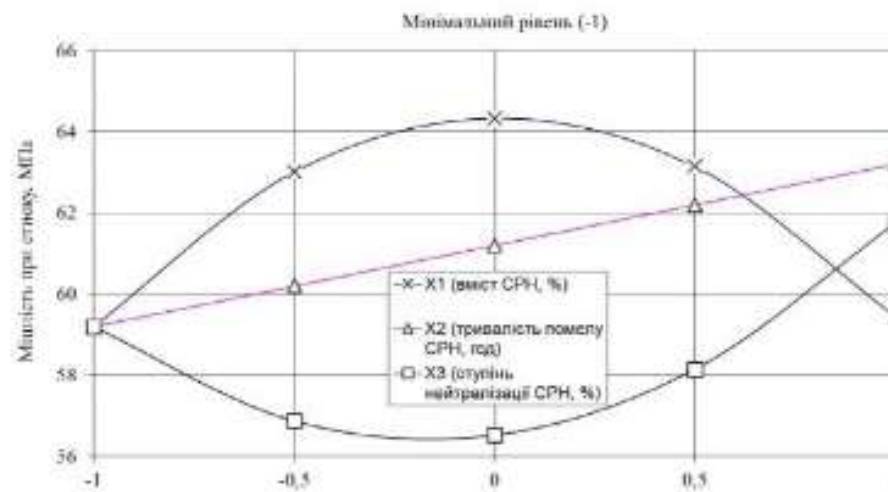
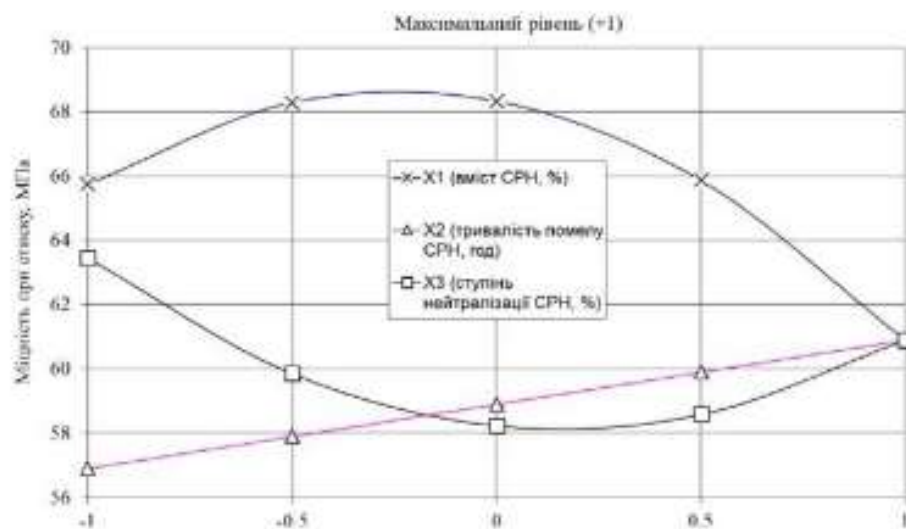
9



Залежність міцності портландцементу від тривалості помелу, вмісту та ступеня нейтралізації в віці 1 доба

# ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗРАЗКІВ В ВІЦІ ДВІ ДОБИ

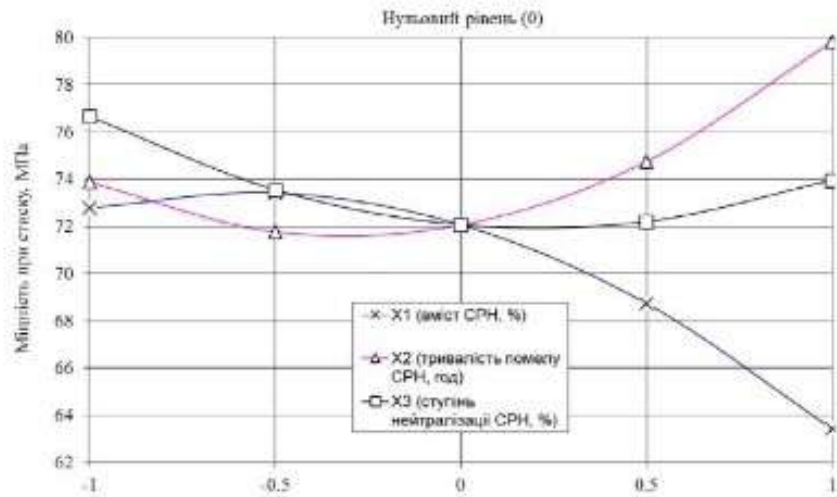
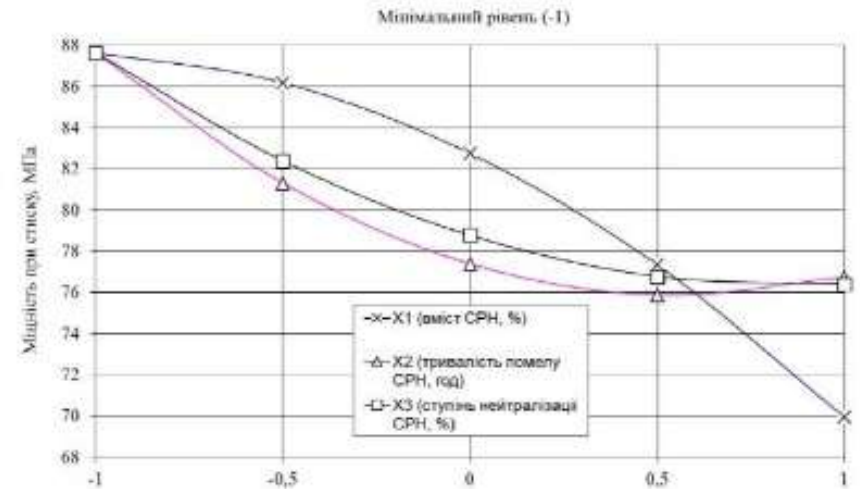
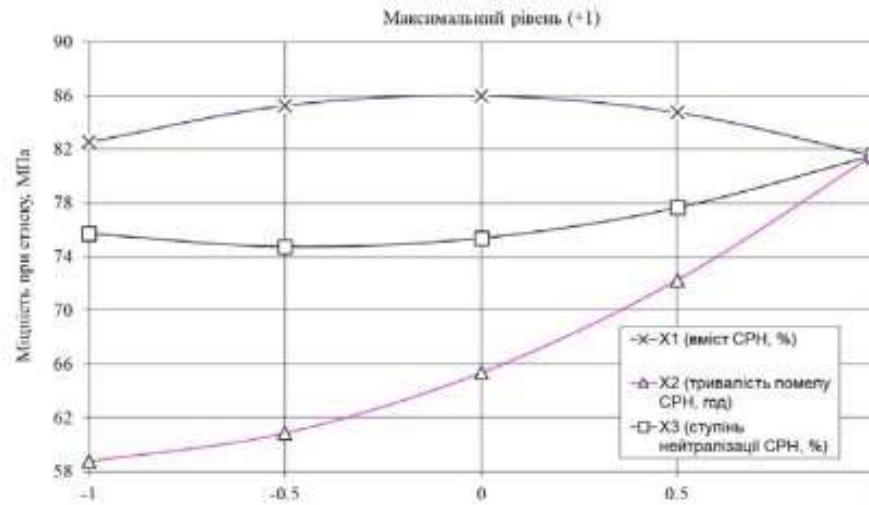
10



Залежність міцності портландцементу від тривалості помелу, вмісту та ступеня нейтралізації в віці 2 доби

# ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗРАЗКІВ В ВІЦІ 7 ДІБ

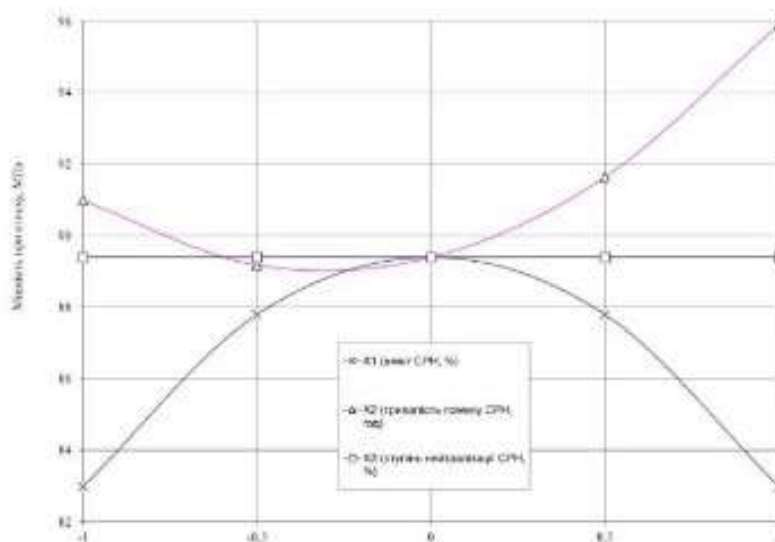
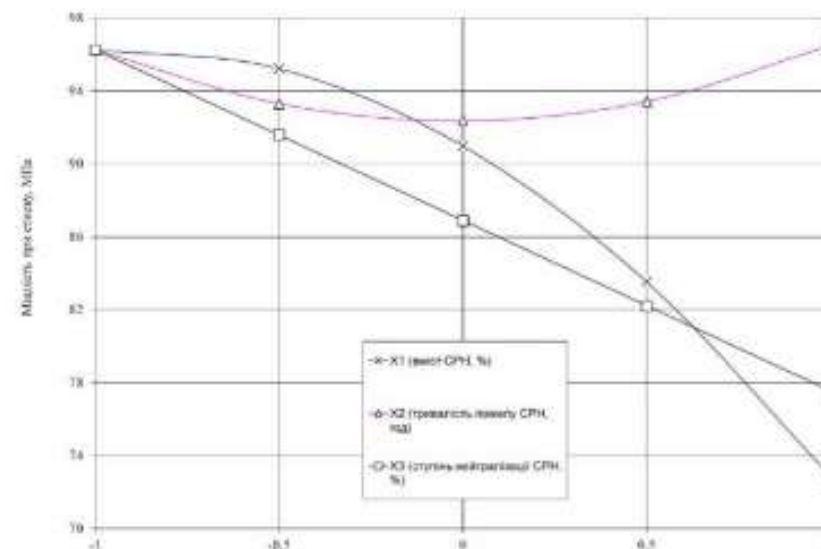
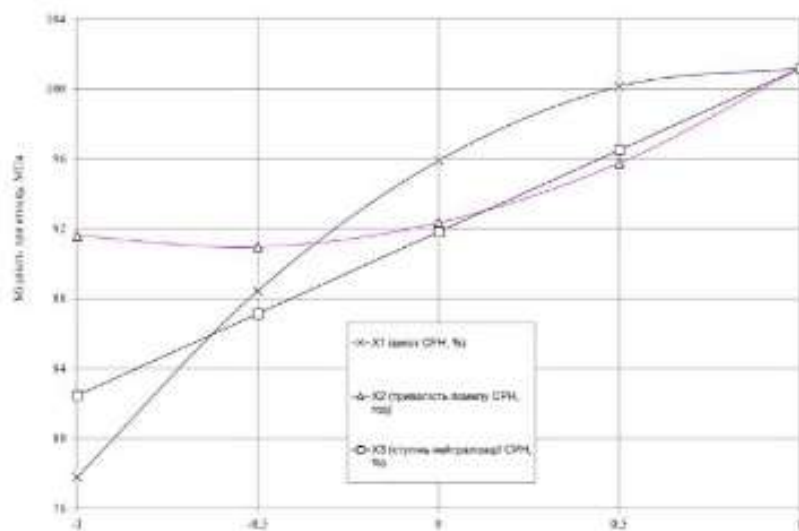
11



Залежність міцності  
портландцементу від тривалості  
помелу, вмісту та ступеня  
нейтралізації в віці 7 діб

# ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗРАЗКІВ В ВІЦІ 28 ДІБ

12



Залежність міцності  
портландцементу від тривалості  
помелу, вмісту та ступеня  
нейтралізації в віці 28 діб