

Л.Й. Дворкін
В.В. Житковський, В.В. Марчук

**ЕФЕКТИВНІ СУХІ БУДІВЕЛЬНІ
СУМІШІ ТА РОЗЧИНИ
НА ЇХ ОСНОВІ**

Монографія

За редакцією

Заслуженого діяча науки і техніки України
доктора технічних наук, професора Л.Й. Дворкіна

Київ 2024

УДК 691.5

Д 24

Рецензенти:

Лаповська С.Д., доктор технічних наук, професор, Державне підприємство "Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів";

Шинкевич О.С., доктор технічних наук, професор, Одеська державна академія будівництва та архітектури.

Рекомендовано вченою радою навчально-наукового інституту будівництва та архітектури Національного університету водного господарства та природокористування.

(Протокол № 2 від 10 жовтня 2023р.)

Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В.

Д24 Ефективні сухі будівельні суміші та розчини на їх основі: монографія. – Київ: Каравела, 2024. **180** с.

ISBN

У монографії наведені результати експериментальних досліджень сухих будівельних сумішей з використанням техногенних дисперсних наповнювачів і органо-мінеральних добавок-модифікаторів, а також будівельних розчинів на їх основі. Показані шляхи ресурсозбереження і покращення фізико-механічних властивостей розчинів. Приведені експериментально-статистичні моделі, що дозволяють кількісно оцінити вплив технологічних факторів на властивості розчинів. Обґрунтовані нові способи отримання будівельних розчинів різного призначення на основі сухих сумішей.

ISBN

УДК 691.5

© Дворкін Л.Й., Житковський В.В.,
Марчук В.В., 2024

© «Каравела», 2024

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕДМОВА	5
1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА І ОСНОВНІ РІЗНОВИДИ СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ	7
1.1. Загальні відомості.....	7
1.2. Основні види сухих сумішей.....	13
2. МІНЕРАЛЬНІ ДИСПЕРСНІ НАПОВНЮВАЧІ ЯК АКТИВНІ КОМПОНЕНТИ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ	38
2.1. Теоретичні передумови.....	38
2.2. Вплив мінеральних наповнювачів на властивості цементних розчинів та бетонів	42
2.3. Шляхи активації мінеральних наповнювачів.....	45
3. БУДІВЕЛЬНІ РОЗЧИНИ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ ЗОЛОВМІСНИХ СУМІШЕЙ	51
3.1. Основні передумови застосування золи-виносу в сухих будівельних сумішах.....	51
3.2. Характеристика вихідних матеріалів.....	59
3.3. Реологічні та структурно-механічні властивості цементно-зольних паст.....	62
3.4. Особливості структуроутворення та гідратації модифікованих цементно-зольних паст.....	76
3.5. Технологічні властивості цементно-зольних розчинних сумішей.....	93
3.6. Адгезійні властивості цементно-зольних розчинів із добавками-модифікаторами.....	125
3.7. Міцність цементно-зольних розчинів з добавками ПФМ.....	141
3.8. Деформативні властивості розчинів з модифікуючими добавками.....	158
3.9. Водонепроникність, корозійна та морозостійкість розчинів з добавками ПФМ.....	166
4. СУХІ БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПИЛУ КЛІНКЕРОВИПАЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ	179

4.1. Пил-виносу клінкеровипалювальних печей – активний компонент в'язучих систем.....	179
4.2. Реологічні та структурно-механічні властивості водних паст у системах пил-шлак-суперпластифікатор та пил-шлак-цемент-суперпластифікатор.....	184
4.3. Технологічні параметри отримання композиційних цементнопилошлакових в'язучих (ЦПШВ) низької водо потреби.....	205
4.4. Сухі будівельні суміші та розчини на основі композиційних цементнопилошлакових в'язучих.....	219
4.5. Технологічні властивості розчинових сумішей.....	240
5. БУДІВЕЛЬНІ РОЗЧИНИ НА ОСНОВІ СУМІШЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АСПІРАЦІЙНОГО ГРАНІТНОГО ПИЛУ (АГП).....	250
5.1. АГП як дисперсний наповнювач розчинів.....	250
5.2. Порівняльні дослідження впливу АГП та золи-виносу на міцність цементних розчинів.....	254
5.3. Вплив дисперсності АГП на властивості цементних розчинів.....	259
5.4. Мурувальні розчини на основі сухих будівельних сумішей з використанням гранітного аспіраційного пилу високої дисперсності (ГАПВД).....	267
6. БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ.....	273
6.1. Реакційно-порошкові бетони як напівфабрикат для виготовлення сухих будівельних сумішей (СБС) для розчинів різного призначення.....	273
6.2. Дослідження впливу виду редиспергованого полімеру на властивості СБС.....	277
6.3. Ремонтні суміші.....	281
6.4. Гідроізоляційні суміші.....	295
6.5. Поризовані та теплоізоляційні суміші.....	304
6.6. Суміші для наливних підлог.....	315
6.7. Склад і властивості керамзитобетонів.....	323
ЛІТЕРАТУРА.....	333

ПЕРЕДМОВА

Сучасне будівництво характеризується все більш широким застосуванням сухих будівельних сумішей, ретельно віддозованих і перемішаних у заводських умовах розчинових та бетонних сумішей, що замішуються водою на будівельному майданчику.

При виробництві будівельних робіт ефективність сухих сумішей проявляється у високому рівні механізації, суттєвому скороченні термінів будівництва, зниженні трудомісткості та виробничих витрат, забезпеченні високої якості.

Ефективність сухих сумішей істотно підвищується при використанні дисперсних наповнювачів – різних техногенних продуктів, що є промисловими відходами, і модифікуючих добавок, що дозволяють забезпечити та істотно покращити властивості будівельних розчинів і бетонів.

У монографії наведені результати досліджень, виконаних на кафедрі технології будівельних виробів та матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування. Дослідження показали можливість суттєвого зниження витрати цементу в сухих сумішах різного призначення при заміні його золою-виносу, пилом клінкеровипалювальних печей та аспіраційним пилом, отриманим при подрібненні граніту. Для підвищення якості розчинів на основі сухих сумішей запропоновано органічно-мінеральні добавки-модифікатори.

Новим напрямком у технології сухих будівельних сумішей є використання в якості напівфабрикату реакційно-порошкових бетонів (РПБ). Воно дозволяє з напівфабрикату при додатковому коригуванні його складу безпосередньо на будівельному майданчику одержувати сухі суміші, розчини та бетони різного призначення. У монографії наведено рецептури та властивості ремонтних, гідроізоляційних, поризованих та теплоізоляційних сумішей, а також сумішей для наливної підлоги та керамзитобетону на основі РПБ.

При виконанні досліджень результати яких наведені в монографії, широко використовувалися методи

експериментально-статистичного моделювання, що дозволили дати необхідні кількісні оцінки впливу технологічних факторів на якість матеріалів та визначити ефекти їхньої взаємодії.

Автори вдячні рецензентам д.т.н. проф. Лаповській С.Д та д.т.н. проф. Шинкевич О.С. за зауваження, враховані під час підготовки монографії. Також автори вдячні інженерам Киц Г.В. та Мацько Л.А. за технічну допомогу при підготовці монографії до видання.

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА І ОСНОВНІ РІЗНОВИДИ СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

1.1. Загальні відомості

Сучасне будівництво характеризується все більш широким застосуванням сухих будівельних сумішей – ретельно віддозованих і перемішаних в заводських умовах розчинових сумішей, які заміщуються водою на будівельному майданчику.

При виробництві будівельних робіт ефективність сухих сумішей виявляється у високому рівні механізації, істотному скороченні термінів будівництва, зниженні трудомісткості і виробничих витрат, забезпеченні високої якості. Очевидні переваги сухих сумішей перед звичайними розчинами за такими показниками як зниження витрат на перевезення, спрощення технології приготування розчинів на будівництві, можливість централізованого виготовлення в заводських умовах, що забезпечує сталість їхнього складу, заданий рівень властивостей [1].

Транспортувати сухі суміші можна як при додатніх, так і при від'ємних температурах без обмежень по дальності. Сухі суміші можуть використовуватися на будівельному об'єкті дрібними порціями, зберігатися достатньо тривалий час без погіршення при цьому своїх властивостей [2].

Вони класифікуються (рис. 1.1) за:

- основним призначенням (видом робіт);
- видом в'язучого в суміші;
- ступенем модифікації добавками;
- найбільш характерною властивістю в затверділому стані;
- умовами використання.

Сухі суміші почали здавна використовуватися в будівельних роботах. Зокрема знайшли використання так звані "гарцовки" (суміші цементу та кварцового піску з вапном), окремі види шпаклівок, однак нове народження цього виду будівельних матеріалів пов'язано із створенням системи функціональних добавок для надання будівельним розчинам спеціальних властивостей. В останні 10-20 років були синтезовані цілі групи добавок, які забезпечують будівельним

За призначенням розрізняють мурувальні, лицевальні, шовні, шпаклювальні, штукатурні, клейові, герметизуючі суміші та ін.; за видом основного в'язучого – гіпсові, ангідритові, вапняні, магнезійні, цементні, цементно-вапняні, полімерні та ін.; за ступенем модифікації – економічні, стандартні, високоякісні; за характерною властивістю в затверділому стані – адгезійні, атмосферостійкі, швидкотверднучі, водонепроникні, морозостійкі, високоміцні, такі, що саморозтікаються, еластичні та ін.; за умовами використання – ручного і машинного нанесення, для пористих матеріалів і т.д.

Однакова суміш нерідко може бути використана при виконанні різних видів робіт.

Сухі суміші, які містять в своєму складі в'язучі одного типу, називають простими, змішані в'язучі – складними.

Поряд з в'язучими і заповнювачами в сухі будівельні суміші вводять мінеральні добавки (наповнювачі) – порошкоподібні або волокнисті матеріали, що застосовуються для економії в'язучих, поліпшення і регулювання властивостей розчинів [3, 4].

Регулювання будівельно-технологічних і експлуатаційних властивостей сухих сумішей досягається введенням різноманітних хімічних добавок, які можна об'єднати в групи [5]:

- пластифікатори та суперпластифікатори;
- водоутримуючі;
- загушуючі;
- покращуючі адгезію;
- регулюючі фізико-механічні характеристики (опір зсуву, міцність на стиск на згин та ін.);
- регулюючі строки тужавлення;
- знижуючі усадочні деформації;
- підвищуючі атмосферостійкість та морозостійкість (для фасадних матеріалів);
- такі, що надають матеріалу гідрофобні властивості.

За хімічною природою це можуть бути продукти як неорганічного, так і органічного синтезу: мінеральні соли,

редисперговані полімерні порошки, ефіри целюлози, ефіри крохмалю, поверхнево-активні речовини (ПАР) та ін. Як правило, для забезпечення заданого рівня властивостей цільового призначення суміші необхідна одночасна присутність добавок різної природи [6, 7].

Для сумішей, що наносяться тонким шаром на пористі поверхні, важливо забезпечити необхідну водоутримуючу здатність. Швидке поглинання води основою не тільки приводить до втрати матеріалом пластичності, але і є причиною недостатньої гідратації в'язучого, зниження міцності, адгезії і морозостійкості. Модифікування сухих сумішей для поліпшення їхньої водоутримуючої здатності, пластичності, життєздатності досягається введенням добавок на основі ефірів целюлози, гідроксиетил- і гідроксипропілметилцелюлози в кількості 0,05-0,5%.

Знаходить широке використання *метилцелюлоза* – метиловий ефір целюлози, добре розчинний в воді до густини розчину 1,29-1,31г/см³, з насипною густиною 0,3-0,5г/см³. При набряканні в воді об'єм метилцелюлози збільшується в десятки разів. Макромолекули метилцелюлози навіть в розбавлених водних розчинах схильні до агрегації. Водні розчини стабільні при рН від 2 до 12. В водних розчинах метилцелюлоза має гарні поверхнево-активні властивості, при нагріванні до температури 35-36 С спостерігається желатинізація. Зі зниженням температури до температури желатинізації гель руйнується. Метилцелюлоза здатна зберігати свої властивості після розчинення в воді, повторного висушування і диспергування.

Для підвищення водоутримуючої здатності сухих сумішей вводять також *бентонітові глини* – природні алюмосилікати, які характеризуються високою дисперсністю, набряканням, іонообмінною здатністю. Ці глини складаються з мінералів групи монтморилоніту з загальною формулою $Al_2O_3 \cdot 4Si_2O_2 \cdot nH_2O$. У виробництві сухих сумішей рекомендується використовувати бентонітові глини, модифіковані органічними речовинами. Вони чинять менш значний вплив на водоутримуючу здатність будівельних розчинів, ніж метилцелюлоза.

Більш високий рівень модифікації забезпечується шляхом введення до складу сухих сумішей *редиспергованих сополімерних порошків*, які можуть виступати як добавки або самостійні полімерні в'язучі. Загальна характеристика редиспергованих полімерних порошків приведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Загальна характеристика
редиспергованих полімерних порошків (РПП)

Характеристики	Значення
Хімічна природа	Вінілацетат, вінілацетат – етилен, вінілацетат – версатат, вінілацетат – акрилат, акрилат, бутилакрилат – стирол, стирол – акрилат
Насипна густина, кг/м ³	140...500
Вміст антикоагулянту, %	10...15
Вміст добавок проти злежування, %	5...15
Мінімальна температура утворення плівки, °С	0...25
Зольність, %	0,5...13
В'язкість, м·Па·с (при 20 об/хв)	500...5500
Середній розмір частинок, мкм	0,01...0,5
pH 30%-ї дисперсії	4...12

Редисперговані порошки одержують висушуванням водних дисперсій полімерів звичайно методом розпилювального сушіння. Мінеральні в'язучі не завжди задовільно працюють на розтяг і згин, мають недостатню адгезію особливо до таких матеріалів як глазурована кераміка, пластики, метали, пінополістирол і т.п. При дозуванні редиспергованих сополімерних порошків від 0,5 до 5% значно поліпшуються технологічність сумішей, адгезія до основи, знижується водопоглинання (рис. 1.2, 1.3), підвищуються міцність на згин, водостійкість, морозостійкість. При дозуванні 5...7%

редисперговані порошки починають працювати як самостійні полімерні в'язучі. Модифіковані ними матеріали починають виявляти еластичні властивості, витримують великі деформуючі навантаження, мають підвищену стійкість проти стирання [8].

На відміну від рідких і пастоподібних продуктів модифіковані полімерами суміші стійкі до впливу низьких температур і бактеріальних забруднень.

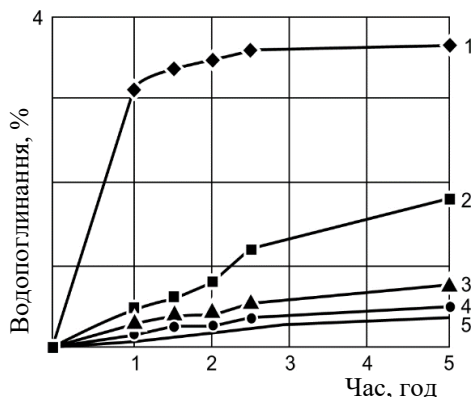


Рис. 1.2. Водопоглинання мінеральних штукатурок залежно від вмісту редиспергованого полімерного порошку "Віннапас": 1 – вміст порошку 0,5%; 2 – 1%; 3-1,5%; 4-2%; 5-5%

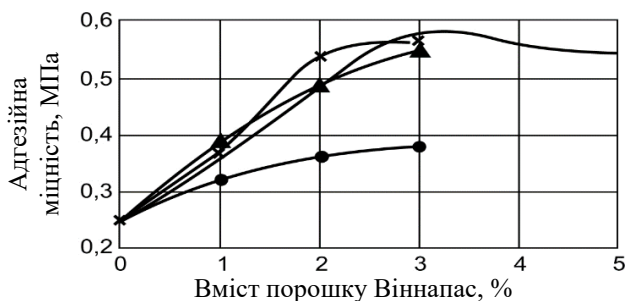


Рис. 1.3. Залежність адгезійної міцності декоративних штукатурок до бетонної поверхні від кількості редиспергованого полімерного порошку 'Віннапас' різних марок

Ряд хімічних добавок надають сухим сумішам підвищеної тіксотропності, мають розріджувальний ефект, регулюють строки тужавлення, прискорюють твердіння та ін.

Найбільш ефективними розріджувальними добавками є *суперпластифікатори* – продукти поліконденсації меламінформальдегіду, полікарбоксилатів, поліакрилатів та ін. Вони вводяться до складу сухих сумішей в кількості від 0,05 до 1,5% маси в'язучого для збільшення текучості розчинів, зниження водопотреби і, як наслідок, збільшення кінцевої міцності, щільності й однорідності затверділого каменю. Особливо рекомендуються ці добавки в рецептурах сумішей, що самовирівнюються, де вони відіграють роль розріджувачів, пластифікаторів, диспергаторів і зменшують усадку.

Для уповільнення строків тужавлення гіпсових в'язучих застосовують добавки (лимонна кислота й ін.), які дозволяють збільшувати час роботи з гіпсом пропорційно їхньому дозуванню (0,01-0,08% за масою).

Ефективними прискорювачами твердіння є формиати кальцію і їхні модифікації, застосовувані в кількості 1-4% від маси в'язучого.

В комплекс спеціальних хімічних добавок входять: згущувачі, диспергатори, пороутворювачі, антиспінуювачі, гідрофобізатори, консерванти й ін. [7, 9, 10, 11].

1.2. Основні види сухих сумішей

Суміші для штукатурних робіт містять мінеральні в'язучі, заповнювачі, наповнювачі та різні добавки, у тому числі такі, що підвищують паропроникність і зменшують усадку розчинів.

За видом основного в'язучого штукатурні суміші поділяють на цементні, цементно-вапняні та гіпсові. Залежно від крупності заповнювача вони бувають дрібнозернисті (до 0,315мм), середньозернисті (0,315...1,2 мм) і крупнозернисті (1,2...2,5 мм і більше).

Розчинові суміші повинні мати зчеплення з основою не менше 0,5 МПа, їх паропроникність – не менше 0,1 мг/(м·год·Па).

По закінченню процесу тверднення штукатурки на поверхні не повинні утворюватися тріщини.

Цементні штукатурні суміші повинні:

– при виконанні зовнішніх робіт забезпечувати високу стійкість покриття до впливу вологи і різних кліматичних факторів, у тому числі від’ємних і підвищених температур, мати коефіцієнт водопоглинання не більш 0,2 кг/м²·год;

– легко наноситися і вирівнюватися.

Гіпсові суміші призначені для опорядження внутрішніх поверхонь приміщень. До їх складу входять: будівельний гіпс, вапно, заповнювачі, полімерні добавки, сповільнювачі тужавлення й інші добавки.

Гіпсові штукатурні суміші повинні:

– не руйнуватися при періодичному короткочасному зволоженні;

– забезпечувати можливість регулювання процесу тужавлення в широкому діапазоні часу (1...2 год).

Штукатурні суміші поділяють на шість груп:

– ШТ1 і ШТ2 – для штукатурення бетонних та цегляних поверхонь (окрім ніздрюватих бетонів);

– ШТ3 – штукатурення ніздрюватих бетонів;

– ШТ4 – штукатурення декоративне та систем теплоізоляції;

– ШТ5 – штукатурення теплоізоляційними розчинами;

– ШТ6 – штукатурення гіпсовими або вапняними розчинами.

Вимоги до штукатурних сумішей наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Вимоги до сумішей для штукатурних робіт та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи					
	ШТ1	ШТ2	ШТ3	ШТ4	ШТ5	ШТ6
Сухі суміші						
Крупність заповнювача, мм, не більше	0,63	0,8	1,25	-	2,5	0,63
Розчинові суміші						
Термін придатності, хв, не менше	60	60	60	60	60	30
Рухомість, см, не менше	8	6	8	-	-	8

продовження табл. 1.2

Назва показника	Значення показника для групи					
	ШТ1	ШТ2	ШТ3	ШТ4	ШТ5	ШТ6
Розчини						
Міцність зчеплення з основою після: – витримування в повітряно-сухих умовах, МПа, не менше; – попереминого заморожування та відтавання, 75 циклів, МПа, не менше	0,3	0,3	–	0,5	0,2	0,1
	–	–	–	0,5	0,2	–
Границя міцності на стиск через 28 діб, МПа, не менше	5,0	7,0	2,5	–	1,0	0,5
Границя міцності на розтяг при згині через 28 діб, МПа, не менше	1,2	2,0	1,2	–	0,5	0,1
Коефіцієнт водопоглинання, кг/м ² · √год, не більше	–	–	–	0,5	0,6	–
Паропроникність, мг/м·год·Па, не менше	0,07	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05
Тріщиностійкість	Відсутність тріщин на шарі товщиною, яка дорівнює максимально рекомендованій товщині нанесення за один прохід					
Теплопровідність, Вт/(м·К), не більше	–	–	0,3	–	0,2	–

До групи *реставраційних розчинів* відносяться розчини на основі сухих модифікованих сумішей для улаштування реставраційних штукатурок (РС1, РС2). Вимоги до реставраційних розчинів приведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Вимоги до сумішей для улаштування реставраційних
штукатурок та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи	
	PC1	PC2
Сухі суміші		
Крупність заповнювача, мм, не більше	1,25	0,8
Розчинові суміші		
Термін придатності, хв, не менше	60	6
Рухомість, см	7,0±0,5	7,0±0,5
Розчини		
Границя міцності на стиск, МПа,	2-6	1,5-5
Водопоглинання за 24 год, кг/м ² , не більше	1,0	0,3
Густина, кг/м ³ , не більше	-	1500
Вміст повітряних пор, %, не менше	20	25
Паропроникність, мг/м·год·Па, не менше	0,15	0,15
Морозостійкість, циклів, не менше	50	50
Здатність до насичення солями, %, не менше	20	25

Широке застосування в опоряджувальних роботах знаходять суміші для *полімерцементних і полімерних декоративних штукатурок*. Вони призначені для зовнішнього і внутрішнього декоративного опорядження поверхонь будинків по бетонних і цегельних основах, систем теплоізоляції фасадів та ін. Полімерцементні декоративні штукатурки класифікуються на:

- А – крупнодисперсні для внутрішніх робіт;
- В – крупнодисперсні, для зовнішніх робіт;
- С – призначені для опорядження будівельних конструкцій з підвищеною щільністю структури (важкі бетони,

азбестоцементні листи та ін.);

D – поліпшені, можливе нанесення на глазуровану плитку;

E – дрібнодисперсні з водозахисними властивостями для внутрішніх і зовнішніх робіт.

В табл. 1.4, 1.5 наведені характерні склади і нормовані властивості полімерцементних декоративних штукатурок, отриманих із сухих сумішей.

Таблиця 1.4

Склади полімерцементних декоративних штукатурок

Компонент	Вміст компонентів, % в штукатурках				
	A	B	C	D	E
Білий портланд-цемент марки 400	10-15	10-15	15-20	15-20	15-25
Гідратне вапно	5-15	5-10	10-15	5-10	5-10
Кварцовий пісок	66,35-82,9	62,35-80,9	52,85-68,45	34,85-35,45	
Розподіл по фракціях:					
0,5-1,2 мм	30%	30%	25%	40%	–
0,25-0,5 мм	45%	45%	50%	30%	–
0,125-0,25 мм	20%	20%	20%	20%	–
0,05-0,125 мм	5%	5%	5%	10%	–
Пігменти (діоксид титану + кольорові пігменти)	2-3	3-5	3-5	3-5	10-15
Карбонатний наповнювач 2-40 мкм	0-5	0-5	2-4	20-40	37-56,9
Редиспергований порошок "Віннапас" з гідрофобними властивостями	До 0,5	1,0	1,5-3	1,5-3	3-5
Армуючі добавки	–	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5
Метилцелюлоза	0,10-0,15	0,10-0,15	0,10-0,15	0,10-0,15	0,1-0,2
Добавки (для поліпшення реологічних властивостей)	–	–	0-2	0-2	–

Таблиця 1.5

Основні властивості полімерцементних декоративних
штукатурок

Показник	Декоративні штукатурки				
	A	B	C	D	E
Затверділі розчини					
Міцність на стиск, МПа, не менше	3,5	5,0	5,0	5,0	5,0
Міцність на розтяг при згині, МПа, не менше	1,5	2,5	2,2	2,2	2,2
Адгезійна міцність до бетону, МПа не менше	0,2	0,4	0,6	0,6	0,6
Водопоглинання, %, не більше	–	6	4	4	3
Морозостійкість, цикли, не менше	–	35	50	50	50
Розчинові суміші					
Рухомість	Регулюється технологічними добавками і кількістю вапна в рецептурі				
Розшаровуваність, %, не більше	2	2	2	2	2
Водоутримуюча здатність, %, в межах	90	90-95	95	95	95
Термін придатності, год, не менше	2	2	2	2	2

Суміші для підготовки поверхні – системи, що містять мінеральні в'язучі, заповнювачі та різні добавки, у тому числі такі, що знижують прилипання розчинової суміші до інструменту.

Вони повинні:

- мати зчеплення з основою не менше 0,5 МПа;
- паропроникність не менше 0,1 мг/(м·год·Па);
- бути морозостійкими (для зовнішніх робіт) і витримувати не менше 50 циклів заморожування і відтавання;

- легко укладатися на основу, не залишаючи смуг і не тягтися за інструментом;
- мати стійкість до тріщиноутворення і мінімальну усадку, що повинна не перевищувати 0,2%;
- шліфуватися і фарбуватися, у тому числі фарбами на органічних розчинниках;
- не стікати з вертикальних поверхонь;
- бути водостійкими (на основі цементу).

При підготовці поверхонь під опорядження шпалерами, фарбами, декоративними покриттями застосовують *шпаклювальні та ґрунтувальні суміші*. На відміну від штукатурних їх наносять тонким (0,2...3 мм) шаром.

Вимоги до шпаклювальних сумішей і приклади їх рецептур наведені в табл. 1.6. і 1.7.

Таблиця 1.6

Вимоги до сумішей для шпаклювання та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи		
	ШЦ1	ШГ1	ШП1
Сухі суміші			
Крупність заповнювача, мм, не більше	0,2	0,2	0,2
Розчинові суміші			
Термін придатності, хв, не менше	30	30	180
Рухомість, см	7±2	7±2	7±2
Розчини			
Границя міцності на стиск, МПа, не менше:			
- через 7 діб;	-	2,5	-
- через 28 діб	7,0	-	-
Границя міцності на розтяг при згині, МПа, не менше:			
- через 7 діб;	-	0,4	-
- через 28 діб	1,0	-	-

продовження табл. 1.6

Назва показника	Значення показника для групи		
	ШЦ1	ШГ1	ШП1
Тріщиностійкість	Відсутність тріщин на шарі товщиною, яка дорівнює максимально рекомендованій ширині шва		
Морозостійкість, циклів, не менше	75	-	-
Паропроникність, мг/м ² ·год·Па, не менше	0,05	0,07	0,05
Усадка, мм/м, не більше	1,5	0,5	-
Міцність зчеплення з основою після витримування в повітряно-сухих умовах, МПа, не менше	0,3	0,3	0,2

Таблиця 1.7

Приклади рецептур шпаклювальних сумішей

Найменування компонентів сумішей	Компонентний склад сумішей, мас.%			
	Суміші на основі цементу		Суміші на основі гіпсу	
	Шпаклівки загального призначення	Шпаклівка фінішна	Шпаклівки загального призначення	Шпаклівки для закладення тріщин і стиків
Портландцемент/глиноземистий цемент	38...42	-	-	-
Білий цемент	-	35...40	-	-
Гіпс (напівгідрат)	-	-	30...45	70...88
Гідратне вапно	0...10	8...12	-	2-5

продовження табл. 1.7

Найменування компонентів сумішей	Компонентний склад сумішей, мас.%			
	Суміші на основі цементу		Суміші на основі гіпсу	
	Шпаклівки загального призначення	Шпаклівка фінішна	Шпаклівки загального призначення	Шпаклівки для закладення тріщин і стиків
Кварцовий пісок крупністю до 0,4 мм	44...48	40...45	–	–
Мелена слюда, крейда	0...10	5...10	50...65	15...25
Кварцове борошно	0...10	5...10	–	–
Полімерні волокна	0...1,5	0...1,5	–	–
Полімерний редиспергований порошок	1...4	3...5	1...3	1...3
Ефір целюлози	0,15...0,5	0,15...0,5	0,5...0,8	0,5...1,0
Сповільнювач тужавлення	–	–	0,01...0,05	–

Клейові суміші представлені композиціями які містять мінеральні в'язучі, наповнювачі, заповнювачі та полімерні добавки, що регулюють фізико-механічні та реологічні властивості розчинових сумішей і розчинів.

Клейові суміші всіх груп повинні:

- забезпечувати достатню міцність зчеплення матеріалів і зберігати цей показник при впливі різних експлуатаційних факторів – від'ємних температур, водного середовища, статичних і динамічних навантажень;
- мати тривалий термін придатності;

- мати високу фіксуючу здатність (опору зрушенню плитки, встановленої на розчинову суміш);
- забезпечувати необхідну тривалість коригування положення плитки.

Більшість клейових складів є сумішами портландцементу і фракціонованого піску переважно з двома основними добавками: водоутримуючої – ефіром целюлози або крохмалю і адгезійної – редиспергуємим полімером. При необхідності в суміш вводять і інші добавки – регулятори властивостей.

Клейові суміші в сухому стані повинні мати вологість не більше 0,3% маси, найбільша крупність зерен не повинна перевищувати 0,63 мм.

Водоутримуюча здатність клейових сумішей розчинів, готових до застосування, повинна бути не менше 98%.

Здатність до змочування клейових сумішей характеризується часом, протягом якого суміш змочує облицювальну плитку. Здатність до змочування клейових сумішей повинна бути не менше 20 хв.

В групу клейових входять розчини для облицювання плиткою на недеформованих основах, що не працюють на згин (ЗК1, ЗК2, ЗК3), на деформованих основах, що працюють на згин (ЗК4), для кріплення елементів систем теплоізоляції (ЗК5) і виробів на основі гіпсового в'язучих (ЗК6), а також облицювання плиткою товщиною понад 10 мм (ЗК7). Вимоги до сухих і розчинових сумішей та розчинів на їх основі для даних груп приведені в табл. 1.8.

Основною вимогою до затверділих розчинових сумішей є міцність клейового з'єднання. Залежно від умов застосування міцність клейових з'єднань повинна відповідати значенням наведеним в табл. 1.8.

Рецептури клейових сумішей досить різноманітні. Загальним для них є наявність портландцементу в кількості 25...40% і кварцового піску – 25...75%. Зниження витрати цементу і, частково, піску досягається введенням дисперсного мінерального наповнювача. В якості наповнювача часто використовують вапнякове борошно.

Таблиця 1.8

Вимоги до сумішей для закріплення матеріалів
та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи						
	ЗК1	ЗК2	ЗК3	ЗК4	ЗК5	ЗК6	ЗК7
Сухі суміші							
Крупність заповнювача, мм, не більше	0,8	0,8	0,63	0,63	0,8	–	0,8
Розчинові суміші							
Термін придатності, хв, не менше	60	60	30	60	120	30	30
Відкритий час, хв, не менше	10	20	10	20	-	15	10
Час коригування, хв, не менше	10	10	10	10	10	10	5
Зміщення матеріалу, що закріплюється, мм, не більше (тільки для стін)	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5
Рухомість, см	–	–	–	–	7±2	5±2	–
Розчини							
Міцність зчеплення з основою після: - витримування в повітряно-сухих умовах, МПа, не менше;	0,5	0,8	0,5	1,0	0,5	0,5	0,8
– замочування у воді, МПа, не менше;	–	0,5	0,5	1,0	–	–	0,5
– перемінного заморожування і відтавання, 50 циклів, МПа, не менше;	–	0,5	-	1,0*	0,5	–	0,5
– температурного впливу, (+70 ⁰ С), МПа, не менше	–	0,5	–	1,0	–	–	0,5

продовження табл. 1.8

Назва показника	Значення показника для групи						
	ЗК1	ЗК2	ЗК3	ЗК4	ЗК5	ЗК6	ЗК7
Прогин, мм, не більше	-	-	-	2,5	-	-	-
Час можливого технологічного пересування, год, не раніше	48	48	3	48	-	-	-

Базові склади типових клейових складів сухих будівельних сумішей наведені в табл. 1.9.

Таблиця 1.9

Базові склади типових клейових сумішей

Компонент	Вміст компонентів% в залежності від варіанту рецептури		
Портландцемент ПЦ-I-500	25...40	30...45	25...40
Глиноземистий цемент	—	—	0,3
Кварцовий пісок крупністю до 0,63 мм	25...75	55...70	40...70
Вапнякове борошно	0,50	—	—
Вапно гідратне	—	0...3,0	0...3,0
Ефір целюлози	0,25..40	0,25...0,6	0,25...0,6
Редиспергірований порошок - РПП	—	0,7...3,0	4,0...8,0
Піногасник	—	0...0,2	0,3...0,5
Волокна целюлози	—	0...0,3	0...1,0
Прискорювач твердіння	—	0...1,0	—
Ефір крохмалю	—	—	0...0,1
Суперпластифікатор	—	0,7	0...1,0

Ефективним наповнювачем клейових сумішей є зола-виносу. Використання золи-виносу позитивно позначається на водоутримуючій здатності розчинових сумішей, міцності розчинів, їх корозійної стійкості, усуває утворення висолів, знижує усадочні деформації. Разом з тим, при використанні золи-виносу як компонента сухих сумішей важливого значення

набуває стабільність її хімічного складу, нормування вмісту незгорілих вуглецевих частинок.

Товщина клейового шару як при облицювальних роботах, так і при кладці становить 1...5 мм. Зменшення товщини клейового шару за системою так званої *тонкошарової технології* запобігає утворенню т.зв. "місточків холоду", зменшуються теплові втрати через огорожувальні конструкції, забезпечується висока адгезія до основи, водо- і морозостійкість. Тонкошарова технологія особливо актуальна при закріпленні теплоізоляційних матеріалів, і при кладці з використанням стінових блоків з пористих бетонів.

Застосування тонкошарової технології клейових розчинів, що укладаються на високопористі основи (пористі бетони, цегляна кладка) обумовлює необхідність забезпечення високої водоутримуючої здатності розчинових сумішей. Цю задачу вирішують введенням до складу клейових сумішей модифікаторів, які відносяться зазвичай до групи ефірів целюлози. Добавка метилгідроетілцелюлози збільшує водоутримуючу здатність цементного розчину до 99% при температурі $20 \pm 2^\circ \text{C}$. При витраті такої добавки в межах 0,2...0,3% від маси суміші втрата води твердеючим розчином практично не відбувається. При введенні добавки ефіру целюлози практично не відбувається зміщення плитки з вертикальної поверхні, поліпшується легкоукладальність суміші. Разом з тим, має місце певне уповільнення процесів структуроутворення цементного розчину. Слід зазначити також підвищену гігроскопічність добавок ефірів целюлози. Зі збільшенням вмісту зазначеної добавки зростає капілярне водопоглинання розчину.

Близькими до ефірів целюлози за ефектом в сухих сумішах є ефіри крохмалю. Їх часто використовують в комбінації з ефірами целюлози, замінюючи до 30% останніх.

Мінеральні в'язучі, забезпечуючи високу міцність на стиск, зазвичай слабо працюють на розтяг і розтяг при згині, і, як правило, не забезпечують достатню адгезію до матеріалів які погано вбирають воду – глазурованої кераміки, пластиків, металів. При дозуванні полімерної добавки 0,5...5% від маси

мінерального в'язучого значно поліпшується технологічність, адгезія, міцність на згин, водостійкість, морозостійкість розчинів. При дозуванні 5...7% полімерні добавки починають працювати як самостійне в'язуче.

Редиспергірованні полімерні порошки (РПП) підвищують адгезію і когезію клеїв, їх тріщиностійкість за рахунок збільшення міцності на розтяг і зносостійкість. Відповідно до сучасних уявлень РПП утворюють в розчинових сумішах еластичні мембрани, модифікуючи мінеральну матрицю, яка представлена твердіючим цементним тістом. Модифікована цементна матриця має поліпшені реологічні властивості, адгезію і тріщиностійкість. Так само, як і водоутримуючі добавки, добавки РПП знижують гідратаційну активність цементу. У той же час, більшість дослідників вважають, що РПП сприяють більш інтенсивному утворенню в цементному камені еттрінгіта.

Для клейових розчинів поряд з водоутримуючою здатністю і адгезією важливе значення має життєздатність (час можливого використання), а також ряд спеціальних властивостей (площа застосування, відкритий час, зміщення). Зазначені властивості повинні забезпечуватися, в першу чергу, раціональним підбором складу розчинових сумішей. Складом розчинів обумовлені також експлуатаційні властивості клейових розчинів і їх надійність.

Суміші для мурувальних розчинів. На ринку сухих сумішей для кладки представлені, в основному, суміші, виготовлені з портландцементу і сухого піску з можливим додаванням гідратного вапна і різних органічних добавок, які покращують експлуатаційні властивості розчинів. Введення добавок направлено на підвищення легкоукладальності розчинів і здатності їх надійно заповнювати горизонтальні і вертикальні шви, забезпечувати високе зчеплення з елементами кладки і її довговічність.

Одним з традиційних компонентів розчинових мурувальних сумішей є вапно. Цементно-піщані розчини з добавкою вапна здатні задовільно демпфувати напруження, що виникають в процесі експлуатації (нерівномірне осідання фундаментів і інших конструкцій будівель, вібрації, поштовхи

при землетрусах і ін.). Загальновідомі також технологічні переваги мурувальних розчинів, що містять вапно.

Традиційна технологія передбачає нанесення мурувальних розчинів кладок шаром 10...20 мм. Оскільки сучасні технології дозволяють виготовляти стінові камені і блоки з мінімальними (до 1 мм) відхиленнями геометричних розмірів від стандартних, стало можливим використовувати тонкошарову кладку з використанням розчинових сумішей на основі тонкодисперсних сухих сумішей з розміром заповнювача не більше 1 мм. В результаті товщина шва кладки складає 1...5 мм.

Суміші для мурувальних розчинів поділяють на групи за призначенням: для мурування цеглою (МР1), блоками та каменями з природного та штучного матеріалу (МР2), стіновими блоками (внутрішні стіни та перегородки (МР3), улаштування теплотзберігаючих огороджувальних конструкцій (МР4). Вимоги до сумішей для мурування, розчинових сумішей та розчинів на їх основі приведені в табл. 1.10.

Таблиця 1.10

Вимоги до сумішей для мурування, розчинових сумішей та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи			
	МР1	МР2	МР3	МР4
Сухі суміші				
Крупність заповнювача, мм, не більше	2,5	1,25	1,25	2,5
Розчинові суміші				
Рухомість, см, не менше	4	5	7	6
Термін придатності. хв, не менше	90	120	90	60
Розчини				
Границя міцності на стиск, МПа, не менше	5	5	5	5
Міцність зчеплення з основою після витримання в повітряно-сухих умовах, МПа, не менше	0,2	0,2	0,2	0,2

Назва показника	Значення показника для групи			
	MP1	MP2	MP3	MP4
Морозостійкість, циклів	25...75	25...75	–	25...75
Теплопровідність, Вт/м·К, не більше	–	–	–	0,35

Примітка. Морозостійкість сумішей для мурування приймається на 10 циклів вища ніж морозостійкість мурувального конструкційного матеріалу.

До спеціальних властивостей мурувальних розчинів можна віднести термін придатності і міцність зчеплення з основою, а для сумішей групи MP4 також теплопровідність.

Суміші для влаштування підлог є полімермінеральними системами, що містять мінеральні в'язучі, заповнювачі, наповнювачі та різні добавки, які підвищують тріщиностійкість, стійкість до стирання, морозостійкість і водостійкість розчинів.

Для покриттів підлог застосовують переважно суміші на основі цементу, гіпсу і ангідриту, створюючи самовирівнюючі наливні підлоги. Характерні склади таких сумішей наведені в табл. 1.11.

У цю групу входять розчини на основі сухих сумішей для улаштування стяжок (СТ1, СТ2, СТ3), прошарків (ПР1, ПР2, ПР3) і покриттів (ПО1, ПО2, ПО3) підлог. Вимоги до розчинових сумішей і розчинів цієї групи приведені в табл. 1.12.

Таблиця 1.11

Суміші для влаштування підлог

Найменування	Цементна стяжка для первинного вирівнювання підлоги (від 10 мм)	Самовирівнючі наливні підлоги (до 5 мм) з казеїном	Самовирівнючі наливні підлоги (до 5 мм) без казеїну	Самовирівнючі наливні підлоги (до 10 мм) на основі гіпсу
Мінеральні компоненти, %				
Портландцемент	30...40	35...45	35...45	1...4
Глиноземистий цемент	-	3...7	3...7	-
Гашене вапно	0...2	1...4	1...4	1...2
Ангідрит	-	-	-	-
Напівгідратний гіпс	-	0...3	0...3	45...55
Вапнякове борошно, 40-100 мкм	0...10	5...10	5...10	20...25
Кварцовий пісок 0,1-0,4 мм	15...25	38...42	38...42	15...30
Кварцевий або вапняковий пісок до 2,0 мм	30...40	-	-	-
Гравій 2...8 мм	8...12	-	-	-
Добавки %				
Ефір целюлози	0,01...0,03	0,05...0,1	0,05...0,1	0,05...0,1
Редиспергований полімерний порошок	0,5...2,5	1,5...2,5	1,5...2,5	1,5...2,5
Суперпластифікатор	0,5.1,0	-	0,5...0,7	0,5...1,0
Казеїн	-	0,5.2,0	-	-
Антивспінювач	0,1...0,2	0,1...0,3	0,1...0,3	0,1...0,2

Таблиця 1.12

Вимоги до сумішей для влаштування елементів підлоги
та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи								
	СТ1	СТ2	СТ3	ПР1	ПР2	ПР3	ПО1	ПО2	ПО3
Сухі суміші									
Крупність заповнювача мм, не більше	1,25	1,25	1,25	0,63	0,63	0,63	1,25	1,25	4,0
Розчинові суміші									
Рухомість, см, не менше	8	8	8	–	–	–	–	–	–
Розтічність, см, не менше	–	–	–	20	20	20	17	17	–
Термін придатності, хв, не менше	20	20	20	20	20	20	20	20	–
Розчини									
Міцність зчеплення з бетонною основою після витримування в повітряно-сухих умовах, МПа, не менше	0,2	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
Границя міцності на стиск, МПа, не менше:									
– через 3 доби	5	5	10	5	7	10	7	10	20
– через 28 діб	15	20	35	15	20	30	25	35	50

продовження табл. 1.12

Назва показника	Значення показника для групи								
	СТ1	СТ2	СТ3	ПР1	ПР2	ПР3	ПО1	ПО2	ПО3
Границя міцності на розтяг при згині через 28 діб, МПа, не менше	3,5	4,5	6,0	3,0	4,0	5,0	5,0	5,0	7,0
Стираність, г/см ² , не більше	–	–	–	–	–	–	0,7	0,7	0,7
Усадка, мм/м, не більше	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5
Морозостій-кість, циклів, не менше	–	–	0	–	–	0	–	5	5

На основі сухих модифікованих сумішей виготовляють самоущільнювальні та самовирівнювальні розчини для підлог, що мають високу текучість і швидко затвердівають. Ці якості дозволяють застосовувати їх для вирівнювання і нивілювання поверхні підлоги. Товщина вирівнюючого шару складає 2...50 мм. Застосування в складі самоущільнювальних сумішей пластифікаторів нового покоління (полікарбоксилатних і поліакрилатних) дозволяє порівняно з іншими пластифікуючими добавками не тільки істотно збільшити пластифікуючий ефект, але і суттєво збільшити його тривалість.

Для підвищення міцності та зносостійкості покриттів підлог застосовують нанесення зміцнюючих сухих сумішей на щойно укладений бетон. Найбільш поширені *зміцнюючі суміші*, що включають фракціонований кварц, корунд, метал, а також портландцемент і добавки. Випускають також кольорові зміцнюючі суміші.

Гідроізоляційні суміші. До групи гідроізоляційних розчинів, що виготовляються на основі сухих будівельних сумішей відносяться розчини для улаштування жорсткої (Гі1) і еластичної (Гі2) гідроізоляції, гідроізоляції систем теплоізоляції (Гі3) і гідроізоляції, здатної до проникнення в основу (Гі4, Гі5). Вимоги до гідроізоляційних розчинових сумішей і розчинів приведені в табл. 1.13.

Таблиця 1.13

Вимоги до сумішей для улаштування гідроізоляції,
розчинових сумішей та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи				
	Гі1	Гі2	Гі3	Гі4	Гі5
Сухі суміші					
Крупність заповнювача, мм, не більше	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Розчинові суміші					
Термін придатності, хв, не менше	60	120	120	30	60
Розчини					
Границя міцності на стиск, МПа, не менше	12	-	4	-	10
Коефіцієнт водопоглинання, $кг / м^3 \cdot \sqrt{год}$, не більше	-	-	0,6	-	-
Усадка, мм/м, не більше	2	-	1,5	-	2
Міцність зчеплення з основою після: - витримування в повітряно-сухих умовах, МПа, не менше; - замочування у воді МПа, не менше*	1,0 1,0	0,5 0,5	0,0800 до пінополістиролу; 0,015 до мінвати Те саме	- 0,8	0,3 0,3
Морозостійкість, циклів, не менше	50	-	50	-	50
Паропроникність, $мг/м \cdot год \cdot Па$, не менше	0,03	-	0,10 по мінваті; 0,04 по пінополістиролу	0,03	0,03

продовження табл. 1.12

Назва показника	Значення показника для групи				
	Гі1	Гі2	Гі3	Гі4	Гі5
Еластичність при згині, мм, не більше	-	20	-	-	-
Водонепроникність за 24 год, у віці 7 діб, МПа, не менше	0,05	0,2	-	-	-

Примітка.* регламентується для сумішей, призначених для гідроізоляції, що експлуатуються в умовах з від'ємним тиском води.

Гідроізоляцію на основі сухих сумішей розділяють на проникаючу, штукатурну, обмазочну та закладочну.

Проникаюча гідроізоляція застосовується для підвищення водонепроникності пористих матеріалів. В результаті проникнення розчинних сумішей відповідного хімічного складу в порах матеріалу утворюються нерозчинні хімічні сполуки які збільшують його щільність і зменшують водонепроникність. Залежно від складу і активності хімічних добавок, що входять до складу розчинів вони можуть проникати на глибину до кількох десятків сантиметрів.

Штукатурна гідроізоляція на відміну від проникаючої є поверхневою. Штукатурну гідроізоляцію наносять зазвичай в один шар. Перед її нанесенням поверхню необхідно підготувати – зачистити, вирівняти, заґрунтувати.

Обмазочна гідроізоляція виготовляється на основі бітумних, полімерних або змішаних лаків, мастик і фарб з додаванням сухих цементних сумішей. Наносити її можна в холодному або гарячому (розтопленому) виді в 2...3 шара.

Закладочну гідроізоляцію виконують з метою герметизації підземних конструкцій, фундаментів і стін споруд. Застосовують суміші, у складі яких присутні добавки, які при зволоженні починають активно розбухати. Коли суміш вкладається в тріщину або зазор між плитами вона розширюється і утворює

щільний водонепроникний шар. Закладочні суміші застосовують для гідроізоляції нерівних або грубо оброблених поверхонь, наприклад, бутової кладки, або зруйнованої цегельної стіни.

Спеціальні сухі суміші виготовляють для **ремонту бетонних і розчинових поверхонь, заповнення швів, анкерування та монтажу**. Вимоги до цих сумішей наведені в табл. 1.14, 1.15, 1.16.

Таблиця 1.14

Вимоги до сумішей для ремонту бетонних і розчинових поверхонь, та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи				
	PM1	PM2	PM3	ІН1	ІН2
Сухі суміші					
Крупність заповнювача, мм, не більше	2,5	1,25	1,25	0,63	0,315
Розчинові суміші					
Термін придатності, хв, не менше	30	30	30	30	30
Розчини					
Границя міцності на стиск, МПа, не менше:					
– через три доби;	5,0	6,0	4,0	10,0	10,0
– через 28 діб	35,0	30,0	20,0	40,0	40,0
Границя міцності на розтяг при згині через 28 діб, МПа, не менше	5,0	5,0	5,0	10,0	12,0
Морозостійкість, циклів, не менше	75	75	–	75	75
Усадка, мм/м, не більше	1,2	1,2	2,0	–	–

продовження табл. 1.14

Назва показника	Значення показника для групи				
	PM1	PM2	PM3	ІН1	ІН2
Міцність зчеплення з основою після:					
– витримування в повітряно-сухих умовах, МПа, не менше	2,0	2,0	0,8	2,0	2,0
– поперемінного заморожування і відтавання 50 циклів, МПа, не менше	2,0	2,0	–	2,0	2,0
Примітка. Для сумішей з короткими термінами тужавлення (менше 30 хв.) термін придатності визначається виробником.					

Таблиця 1.15

Вимоги до сумішей для заповнення швів та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи		
	РШ1	РШ2	РШ3
Сухі суміші			
Крупність заповнювача, мм, не більше	0,4	0,8	0,4
Розчинові суміші			
Термін придатності, хв, не менше	60	60	120
Розчини			
Границя міцності на стиск, МПа, не менше:			
– через три доби	3,0	3,5	3,0
– через 28 діб	10,0	12,0	10,0

продовження табл. 1.15

Назва показника	Значення показника для групи		
	РШ1	РШ2	РШ3
Границя міцності на розтяг при згині через 28 діб, МПа, не менше	2,5	3,5	3,0
Тріщиностійкість	Відсутність тріщин на шарі товщиною, яка дорівнює максимально рекомендованій ширині шва		
Водопоглинання за 24 год, кг/м ² , не більше	1,0	1,2	1,5
Усадка, мм/м, не більше	2,5	2,5	1,5
Міцність зчеплення з основою з бетону після: – витримування в повітряно-сухих умовах, МПа, не менше – замочування у воді, МПа, не менше	0,5	0,5	0,5
	0,5	0,5	0,5
Морозостійкість, циклів, не менше	50	75	50
Стираність, г/см ² , не більше	0,7	0,7	0,7

Таблиця 1.16

Вимоги до сумішей для анкерування та монтажу та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показника для групи	
	АН1	МН1
Суміші		
Крупність заповнювача, мм, не більше	0,315	-
Розчинові суміші		
Термін придатності, хв, не менше	5	30

продовження табл. 1.16

Назва показника	Значення показника для групи	
	АН1	МН1
Розчини		
Границя міцності на стиск, МПа, не менше:		
– через 6 год	10	–
– через одну добу	20	40
– через 28 діб	40	60
Розчини		
Границя міцності на розтяг при згині, МПа, не менше:		
– через 6 год	2,0	–
– через одну добу	2,5	3,5
– через 28 діб	8,0	7,0
Морозостійкість, циклів, не менше	50	50
Міцність на виривання анкера,	100	–
Усадка, мм/м, не більше	–	1,5

Як і в сумішах іншого призначення в них нормують спеціальні властивості які забезпечують їх придатність і надійну експлуатацію за призначенням.

2. МІНЕРАЛЬНІ ДИСПЕРСНІ НАПОВНЮВАЧІ ЯК АКТИВНІ КОМПОНЕНТИ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

2.1. Теоретичні передумови

Ідея введення в цементні системи дисперсних мінеральних наповнювачів (*мікронаповнювачів*) пов'язана з класичними роботами, присвяченими процесам гідратації та структуроутворення цементного каменю [10, 12, 13]. Відповідно до цих робіт наповнювачі – це дисперсні частинки, розмір яких не створює в навколишньому матричному матеріалі власні поля деформацій та напружень, що дозволяє їм брати участь в організації структури в'язучого.

Доцільність введення наповнювачів у цементні композити значною мірою впливає з відомих уявлень [14] про цементний камінь як "*мікробетон*", в якому роль матриці виконує гідратна фаза, отримана при хімічній взаємодії з водою зерен цементу менше 30 мкм, а роль наповнювача – більші зерна цементу, що гідратуються тільки з поверхні. При забезпеченні досить високої тонкості помелу клінкерної складової, виходячи з цієї концепції, частину зерен цементу можна замінити дисперсними матеріалами, у т.ч., що не вступають у хімічну взаємодію з водою. Вже 1930 р. було запропоновано [15] цемент з карбонатними наповнювачами. Було встановлено, що зазначені наповнювачі у певній кількості не викликають різкого падіння міцності. Позитивний ефект наповнювачів дослідники [2; 11; 16] пов'язували з т.зв. *ефектом дрібних порошків*, що розширюють вільний простір, в якому осідають продукти гідратації цементу, що прискорюють процеси твердіння.

Доцільність введення наповнювачів у складі бетонів і розчинів слід також із необхідності забезпечити їх достатню щільність без перевитрати цементу. Для заповнення порожнин між зернами наповнювача може витратитися більше 60% в'язучого, при цьому бере активну участь у формуванні клейового шару тільки менша його частина [17]. Отримання суміші наповнювачів з мінімальною пустотністю є складним техніко-економічним завданням, воно вимагає застосування

великої кількості фракцій. Більш перспективним є збільшення загальної витрати порошкоподібної частини цементних композитів за рахунок розбавлення цементу мінеральними наповнювачами, введення яких можливе як у процесі одержання цементу, так і при отриманні розчинових або бетонних сумішей у стані готовому до вживання або в сухому вигляді.

Мінеральні наповнювачі в цементних системах умовно поділяють на активні та інертні [18]. До *активних* відносять дисперсні мінеральні речовини, здатні взаємодіяти з гідроксидом кальцію, що виділяється при гідролізі клінкерних мінералів (активні мінеральні добавки). До активних наповнювачів відносять також карбонатні порошки, що взаємодіють з алюмінатною фазою цементу з утворенням комплексних сполук типу гідрокарбоалюмінатів [19; 20]. У світлі сучасних теоретичних уявлень про структуроутворення цементних систем другу групу мінеральних наповнювачів, які безпосередньо не вступають у хімічну взаємодію з продуктами гідратації цементу, неточно називати інертними. Вони також активно впливають на фізико-хімічні процеси структуроутворення та синтезу властивостей розчинів та бетонів.

Більш прийнятною є класифікація мінеральних наповнювачів [21] залежно від ступеня їхньої активності по відношенню до продуктів гідратації цементу. Відповідно до цієї класифікації наповнювачі ділять на 4 групи:

I група – дисперсні матеріали, що повільно твердіють (основні шлаки, золи та ін.);

II група – мінеральні порошки, що хімічно взаємодіють з продуктами гідратації цементу (кислі золи та шлаки, мікрокремнезем, метакаолін та ін.);

III група – дисперсні матеріали, що характеризуються низькою реакційною активністю з питомою поверхнею 400...500 м²/кг (андезити, сієніти, діабазити, граніти);

IV група – реакційно неактивні наповнювачі (піролюзит, деякі оксиди металів та ін.).

Ця класифікація також є умовною та справедливою при дисперсності порід, що не перевищує 600 м²/кг. Вона так само, як і попередня, враховує лише хімічну активність, не зважаючи на

такий важливий показник активності наповнювача як величину його поверхневої енергії, що визначає міцність адгезійних контактів у системі цемент-наповнювач. Відповідно до термодинамічної концепції адгезії [22] для створення міцних адгезійних контактів поверхнева енергія наповнювача повинна бути більшою за поверхневу енергію цементу.

Вплив наповнювачів у цементних системах проявляється на мікро-, мезо- та макрорівнях [18].

На *мікрорівні* проявляється молекулярна взаємодія продуктів гідратації цементу із наповнювачем. Хімічно активні кремнеземні наповнювачі в результаті реакції з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – продуктом гідролізу клінкерних мінералів, утворюють додаткові кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію [23; 24]. Карбонатні наповнювачі утворюють комплексні сполуки з гідроалюмінатами та вступають в обмінні реакції з гідросилікатами кальцію [19; 25]. Сутність фізико-хімічної взаємодії наповнювачів із гідратованим цементом полягає у формуванні *епітаксійних контактів*, а також центрів кристалізації. Останні згідно з вченням Гіббса-Фольмера значно зменшують необхідну енергію утворення зародків кристалів гідратних новоутворень у цементному тесті, що твердіє [26; 27-31]. Цей ефект зростає в умовах тепловологісної обробки, а також при зменшенні радіусу зерен наповнювачів, введенні добавок прискорювачів твердіння [18].

При оптимальній концентрації та дисперсності наповнювача утворюється дрібнозерниста структура цементного каменю, що позитивно позначається на його властивостях.

За певних умов можливий і деструктивний вплив наповнювача [18]. Він може мати місце, якщо параметри наповнення виходять за межі оптимуму і в усьому об'ємі цементного каменю або в окремих його ділянках виникають напруження розтягу [18].

На *мезорівні* частинки наповнювача взаємодіють як з частинками цементу, що гідратує, так і між собою. В результаті збільшення об'ємної концентрації твердої фази частина води замішування переходить у плівковий стан і створюються т.зв.

стиснені умови, що позитивно позначається на формуванні структури цементного каменю [32-34].

При досить тонкому шарі дисперсійного середовища частинки наповнювача взаємодіють один з одним. Сили зчеплення частинок можна знайти [35] за формулою:

$$F_c = \frac{2}{3} \pi B r / H^3, \quad (2.1)$$

де r – радіус частинок;

B – константа молекулярної взаємодії;

H – відстань між частинками.

Середня відстань між частинками наповнювача визначається відношенням середнього об'єму матриці V_m до сумарної площі поверхні частинок наповнювача:

$$H_{cp} = V_m / (V_n S_{n,n}), \quad (2.2)$$

де V_n – об'єм наповнювача;

$S_{n,n}$ – питома поверхня наповнювача.

Поряд із поверхневими силами в цементно-водній системі, що містить наповнювачі, за наявності на їх поверхні некомпенсованого електричного заряду діють кулонівські сили. При різній природі в'язучого та наповнювача виникає додаткова сила електростатичного тяжіння (F_e), значення якої може бути обчислено за формулою:

$$F_e = q^2 / (12rH), \quad (2.3)$$

де q – заряд;

r – радіус частинок наповнювача;

H – відстань між ними.

Максимальна міцність контактів між частинками наповнювача в цементній матриці досягається при інтенсивних методах ущільнення наповнених систем або застосуванні пластифікуючих поверхнево-активних речовин (ПАР).

Сили зчеплення між окремими частинками наповнювача збільшуються в міру зменшення товщини на них шару сполучного.

На *макрорівні* наповнювач суттєво впливає на адгезійну міцність між цементним тестом та заповнювачем, а також когезійну міцність матричної складової цементних композитів та їх щільність. Зменшуючи міжзернові відстані в бетонах та розчинах, наповнювачі можуть суттєво збільшувати міцність контактної зони, що позитивно впливає на міцність матеріалів загалом. У роботі [26] показано, що при зменшенні міжзернових відстаней у розчинах на кварцовому піску з 210 мкм до 30 мкм твердість цементного каменю зросла в 1,5...2 рази. Мінімально необхідна товщина шару цементного тіста на зернах заповнювача становить $13 \cdot 10^{-6}$ м. Досягти такого тонкого шару цементного тіста можливо введенням до його складу достатньої кількості наповнювача.

2.2. Вплив мінеральних наповнювачів на властивості цементних розчинів та бетонів

Залежно від виду мінерального наповнювача, його хімічної та фізико-хімічної активності може змінюватись весь комплекс будівельно-технічних властивостей цементних композитів.

Дослідженню впливу різних видів дисперсних мінеральних наповнювачів на властивості цементних розчинів та бетонів присвячено значну кількість робіт [18; 36; 37]. Отримані при цьому результати залежать від виду наповнювачів, їх гідралічної, пуцоланової та поверхневої активності, дисперсності та зернового складу, способу їх введення та вмісту.

Властивості розчинів і бетонів, що містять мінеральні наповнювачі, залежать великою мірою від їхньої водопотреби, що впливає на водопотребу сумішей, необхідну для досягнення заданих показників легкоукладальності. *Водопотреба наповнювачів* обумовлена багатьма факторами: водопоглинанням, формою та особливостями поверхні зерен, дисперсністю [18; 23] та ін. Більшість мінеральних наповнювачів тією чи іншою мірою збільшують водопотребу розчинових або

бетонних сумішей. Водночас такий наповнювач як зола-виносу завдяки склоподібній поверхні частинок, їх сферичній формі, може викликати при оптимальній концентрації пластифікуючий ефект [23]. Цей ефект зменшується або зникає повністю при застосуванні більш грубодисперсних зол, що містять підвищену кількість вуглецевих частинок, що не згоріли, з високим водопоглинанням, а також частинок неправильної форми [38; 36].

У системі "цемент – вода" наповнювач утримується за допомогою *коагуляційних контактів*, міцність яких (f_k) описується формулою:

$$f_k = \nu f(F_p, \phi, S_{num}^2), \quad (2.4)$$

де ν – постійна хімічної взаємодії;

F_p – результуюча сила взаємодії між частинками;

ϕ – ступінь наповнення;

S_{num} – питома поверхня частинок.

Утворення міцних коагуляційних контактів сприяє зниженню водовідділення наповнених цементно-водних сумішей.

Вплив дисперсних наповнювачів на міцність цементних композитів за певної оптимальної концентрації зазвичай є позитивним [39, 40] за умови запобігання суттєвому збільшенню водопотреби суміші.

Міцність наповнених цементних систем формується в результаті синтезу хімічних, фізико-хімічних та фізико-механічних процесів у системі цемент-вода-наповнювач. Характер і величина ефекту наповнювача може коливатися в широкому діапазоні в залежності від того, наскільки змінюється склад і структура матеріалу. При цьому важливе значення мають такі фактори як ступінь гідратації та фазовий склад наповненого цементного каменю, адгезійна міцність цементного каменю по відношенню до наповнювачів, особливості їхньої кристалічної та порової структури [42; 41].

Збільшення ступеня гідратації та обсягу гідратних новоутворень є основним результатом введення таких наповнювачів як золи та шлаки, що мають досить високу

пуцоланову активність [18; 23]. При введенні високодисперсних кремнеземистих наповнювачів з високою поверхневою енергією, таких як мікрокремнезем і метакаолін, істотно змінюються умови утворення конденсаційно-кристалізаційної структури цементного каменю, прискорюється утворення зародків кристалів гідратних новоутворень, структура стає значно щільнішою, різко зростає адгезійна міцність та міцність цементного каменю в контактній зоні із наповнювачами [8, 43-46]. Може бути ефективним введення малоактивних наповнювачів як замість частини цементу, так і піску внаслідок зменшення товщини клейового шару на зернах заповнювачів та зменшення їх пористості [47].

Оптимальна кількість дисперсних наповнювачів у цементних системах коливається, як правило, в інтервалі від 10% до 70%.

Є суперечливі рекомендації щодо оптимальної дисперсності наповнювачів. У роботах [47-49] рекомендується при введенні в цемент інертних або малоактивних наповнювачів тонко подрібнювати клінкерну складову, більш активних наповнювачів – навпаки. Однак у роботах останніх років констатується, що підвищену міцність наповнені дисперсні системи (у присутності суперпластифікаторів) мають при використанні наповнювачів з дисперсністю до 900...1200 м²/кг, тобто такою, що в 2...4 рази перевищує дисперсність цементу [18; 50; 51]. Теоретичні обґрунтування [18; 51] показали, що для цементно-водних систем, наповнених меленим кварцовим піском, оптимальне співвідношення між розмірами наповнювача та в'язучого має знаходитися в межах 8...10. Разом з тим, якщо поверхнева енергія зерен наповнювача значно вище, ніж зерен цементу, бажане співвідношення розмірів їх зерен наближається до 1.

Прогнозуючи вплив наповнювачів на міцність цементних композитів, необхідно враховувати хіміко-мінералогічний склад клінкеру. Встановлено [52], наприклад, що в ранньому віці росту міцності цементно-зольних композитів сприяє підвищений вміст у клінкері лугів, що прискорюють хімічну взаємодію наповнювача та цементу. При використанні всіх видів

наповнювачів, що мають пуцоланову активність, віддають перевагу цементам з підвищеним вмістом аліту, що утворює при гідролізі $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Карбонатні наповнювачі хімічно активні також по відношенню до гідроалюмінату та гідросульфалюмінату, що утворюється при гідратації цементу.

Поряд із впливом активних наповнювачів на міцність при стиску бетонів і розчинів відзначається їх позитивний вплив на відношення міцності на розтяг до міцності на стиск і, відповідно, на тріщиностійкість цементних композитів. Відомо [23], що більш високе співвідношення міцності бетону на розтяг до міцності на стиск має місце при введенні в цемент золи, шлаку, а також використання карбонатних заповнювачів.

Вплив наповнювачів на усадкові деформації неоднозначний. Усадка цементного каменю, як відомо, визначається кількістю адсорбційно-зв'язаної води, що випаровується, і залежить від відносного вмісту гідросилікатів кальцію та їх питомої поверхні. Тому при введенні тонкодисперсних високоактивних наповнювачів очікується деяке збільшення усадкових деформацій. Разом з тим, за зниженої водопотреби відзначається [18; 23] можливе зниження усадкових деформацій наповнених цементних композитів. Це особливо характерно при використанні наповнювачів з низькою хімічною активністю, які так само як і заповнювачі, зменшують відносний вміст у системі гідросилікатів кальцію, що твердіють [21].

Крім міцнісних та деформаційних властивостей, введенням у цементні системи певних мінеральних наповнювачів можна керувати при необхідності їх корозійною стійкістю, екзотермією, жаростійкістю, водонепроникністю та ін [23; 18; 51; 53-66].

2.3. Шляхи активації мінеральних наповнювачів

Аналіз досліджень процесів структуроутворення наповнених цементних систем дозволяє вважати, що активність наповнювачів характеризується їхньою здатністю як до хімічного, так і фізико-хімічного впливу на процеси формування штучного каменю. Хімічна активність наповнювачів здебільшого

має пуццоланову природу і досить добре вивчена [23]. Значно меншою мірою вивчена здатність наповнювачів брати участь у фізико-хімічних та фізико-механічних процесах організації структури цементних порошоків, цементного каменю, розчинів та бетонів [18].

Критерієм фізико-хімічної активності наповнювачів може бути їх поверхнева енергія. Відповідно до термодинамічної концепції адгезії, основна роль у формуванні адгезійної міцності відводиться співвідношенню значень поверхневої енергії адгезиву W_{ad} та субстрату $W_{суб}$. При цьому обов'язковою є умова $W_{ad} < W_{суб}$ [67].

Як відомо, визначення поверхневої енергії твердих тіл важке і про її значення судять опосередковано з допомогою низки розрахункових методів чи виміру деяких механічних характеристик. В. І. Соломатовим [68] як критерій поверхневої активності наповнювачів запропоновано використовувати кислотно-основне відношення поверхневих центрів мінеральних дисперсних речовин. На поверхні однієї і тієї ж частинки можуть одночасно бути присутніми кислотні та основні, окислювальні та відновлювальні центри, що робить поверхню поліфункціональною та здатною взаємодіяти з різними адсорбованими сполуками за різними механізмами.

Встановлено, що активність поверхні наповнювачів залежить не лише від хімічного і мінералогічного складу, але й від наявності домішок, які у деяких випадках можуть виконувати роль легуючих добавок [18].

Під активацією наповнювачів розуміють сукупність технологічних прийомів, направлених на підвищення їх активності [69]. Найбільшою мірою способи активації розроблені стосовно цементу. Основними з них є домол, віброактивація, турбулентна, акустична, ультразвукова, термічна, аеротермічна, електроімпульсна обробка та ін [68, 69, 18].

До теперішнього часу розроблений ряд рекомендацій щодо активації в'язучих і наповнювачів за рахунок модифікування поверхні різними хімічними речовинами, у тому числі і ПАР, галоїдовмісними, кремнійорганічними речовинами, а також за рахунок механічного та радіаційного щеплення в'язучих речовин

та наповнювачів. Більшість способів, що підвищують поверхневу активність в'язучих, прийнятна і для наповнювачів. Проте системних досліджень шляхів активації наповнювачів досі ще не виконано. Класифікація способів активації наповнювачів та вплив активації на механічні властивості цементних розчинів та бетонів наведено у роботі [69] (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Способи активації кремнеземистих наповнювачів та їх вплив на механічні властивості розчинів

Способи активації	Кількість наповнювача від маси цементу, %	Зростання міцності розчинів, %
Домол із створенням захисних плівок	5...15	125...140
Введення активних присадок для підвищення поверхневої енергії	15...30	130...155
Термообробка до скловидного стану	3...18	150
Гідротермальна обробка	30...50	145...165
Гідромеханічна обробка з вапновмісними компонентами	30...40	150...170
Обробка розчинами сильних кислот	10...25	150...165
Обробка гідрофілізуючими ПАР	10...25	115...120
Акустична обробка	≤100	140...180
Електродинамічна обробка	≥100	150...170

До основних досліджених способів активації наповнювачів відносяться подрібнення (механічний спосіб) та модифікування поверхні частинок мінеральними або органічними добавками (хімічний спосіб). Перспективною вважається комбінація обох методів (механіко-хімічний спосіб) [18].

Сутність механічного способу полягає у підвищенні реакційної здатності порошків за рахунок розкриття нових активних поверхонь зерен, зміни кристалічної структури

мінералів, утворення великої кількості ненасичених валентних зв'язків, а при глибокому подрібненні їх аморфізації.

У випадках, що найчастіше зустрічаються, поверхнева енергія наповнювача E_n нижче поверхневої енергії зерен в'язучого E_s ($E_s/E_n > 1$). Відносне співвідношення між розміром частинок наповнювача d_n та зернами в'язучого d_s для цих випадків рекомендується в межах $d_n/d_s = 3...10$ [18]. Ці рекомендації розроблені на основі уявлень про утворення кластерів та поетапної організації структури композиційного матеріалу. У тих випадках, коли поверхнева активність наповнювача вище за поверхневу активність в'язучого, оптимальний розмір частинок наповнювача рекомендується рівним розміру зерен цементу [18]. Подальше зменшення діаметра частинок наповнювача збільшує ймовірність їх об'єднання у кластерні структури, що призводить до розвитку внутрішніх поверхонь розділу та тріщиноутворення. Величина поверхні розділу фаз наповнювач – в'язуче в одиниці об'єму може характеризуватись параметром, пропорційним добутку ступеня наповнення, дисперсності та поверхневої активності наповнювача.

Доцільність активації наповнювача модифікуванням його поверхні добавками ПАР впливає з рівняння Дюпре-Юнга [18], що зв'язує роботу адгезії $W_{ад}$ з поверхневою енергією твердого тіла:

$$W_{ад} = v_t - v_t^*(m + \cos\theta), \quad (2.5)$$

де v_t – поверхнева енергія твердого тіла;

v_t^* – вільна поверхнева енергія твердого тіла в атмосфері парів та газів;

$m = v_p^*/v_p > 1$ (v_p^* – поверхневий натяг рідини, орієнтований під впливом силового поля твердої поверхні; v_p – поверхневий натяг рідини, що змочує.);

θ – крайовий кут змочування.

З рівняння випливає, що для досягнення високої адгезійної міцності важливо забезпечити необхідну змочуваність наповнювача в'язучим і зменшити міжфазну поверхневу енергію, що досягається обробкою наповнювача ПАР.

Зменшення міжфазної поверхневої енергії при створенні адсорбційно-активного середовища визначається з рівняння:

$$\Delta v_{m.жс} = KT \int_0^c n_s(c) d \ln c, \quad (2.6)$$

де $\Delta v_{m.жс}$ – різниця міжфазної поверхневої енергії без ПАР та у присутності ПАР з концентрацією c ;

n_s – величина адсорбції, що визначається числом молекул ПАР, що адсорбувалися на 1 см^2 поверхні розділу фаз;

K – стала Больцмана;

T – абсолютна температура, °С.

Необхідною умовою ефективності ПАР є здатність до хемосорбційної дії з поверхнею частинок наповнювача. У загальному випадку рекомендуються [70] для мінеральних наповнювачів кислотного типу катіоно-активні ПАР, а основного типу – аніоноактивні. Вплив адсорбційно-активного середовища на значення $\Delta\sigma_{m.жс}$ зростає з підвищенням дисперсності наповнювача та його концентрації, що пов'язано зі збільшенням міжфазної поверхні та, відповідно, надмірної поверхневої енергії.

До найбільш ранніх робіт з активації наповнювачів органічними ПАР можна віднести роботи М.І. Хігеровича та Н.В. Нікітіна з активації карбонатного наповнювача милонафтом [71].

Для активації наповнювачів застосовували мікродози органічних речовин, достатні лише для покриття окремих ділянок поверхні частинок твердої фази. Усього 0,0006...0,001% етонію виявилось достатнім при активації частинок карбонатного наповнювача та меленого піску, щоб міцність цементно-піщаного розчину зросла на 25...30%.

Найбільш значущі роботи з модифікації поверхні зерен органічними речовинами виконані В. І. Соломатовим та його школою [68]. Розроблено склади та технологію введення в бетонні суміші полімермінеральних наповнювачів, для активації піску рекомендовані поліізоціаніт, епоксидна смола, поліетиленполіамін, фурфуролакарбамідні та поліефірні смоли.

В роботі Е.Н. Хохриної [68] в якості активаторів меленого піску досліджено мінеральні і органічні добавки 21-го виду, зокрема анілін, фурфурол, кубові залишки синтетичних жирних кислот та інш. В якості основного активатора використаний анілін. При механо-хімічній активації кварцового та зольного наповнювачів показано ефективність добавки суперпластифікатора С-3 [18].

При виборі способу активації наповнювачів необхідно враховувати поряд з ефектом підвищення їх активності технологічність і енергоємність процесу обробки порошкоподібного компонента, можливу продуктивність агрегатів, керованість і стабільність параметрів активованого матеріалу. Найбільш розроблені механічний та механо-хімічний способи активації наповнювачів, засновані на додатковому подрібненні порошкоподібних компонентів, мають ряд недоліків. Основні з них – висока енергоємність, необхідність в умовах заводу ЗБВ монтажу досить складної технологічної лінії, що включає помольний агрегат, пиловловлююче та інше обладнання. Зазначені недоліки не дозволили зокрема реалізувати відому ідею активації дисперсних зол шляхом їх доподрібнення, хоча техніко-економічний ефект, що досягається при цьому, не викликає сумнівів [72].

Більш доступний спосіб підвищення активності наповнювачів у змішувачах-активаторах, що створюють високі градієнти швидкостей та турбулентні потоки, завдяки яким змінюється енергетичний стан поверхні порошоків та підвищується їх активність. Цей спосіб знаходить застосування, хоча і обмежене, для активації цементів і наповненого цементного тіста, де особливо важливий досягнутий ефект дефлокуляції [18]. Стримують поширення зазначеного способу насамперед конструктивні недоліки і недостатня надійність змішувачів-активаторів, нестабільність результатів, що досягаються.

Ефективним є спосіб активації мінеральних наповнювачів суміщенням їх з такими високоактивними кремнеземистими добавками як мікрокремнеземи, метакаолін та ін [73].

3. БУДІВЕЛЬНІ РОЗЧИНИ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ ЗОЛОВІСНИХ СУМІШЕЙ

3.1. Основні передумови застосування золи-виносу в сухих будівельних сумішах

Ефективним напрямком зниження витрати в'язучих і регулювання будівельно-технічних властивостей розчинів є введення активних мінеральних добавок.

Одним з таких ефективних активних наповнювачів цементних систем, як показали підтверджені практичним досвідом численні дослідження, є зола-виносу [74, 10, 75...84]. Зола виносу активно впливає на усіх стадіях гідратації і структуроутворення композиційних будівельних матеріалів, тобто послідовного переходу від коагуляційної структури до утворення просторового кристалічного каркасу.

Зола-виносу, завдяки склоподібній алюмосилікатній фазі, володіє пуцолановою активністю і хімічно взаємодіє з $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який виділяється при гідролізі клінкерних мінералів цементу. Введення золи-виносу в цементно-водні системи не тільки збільшує об'єм гідратних новоутворень, але й прискорює процес гідролізу, збільшує ступінь гідратації цементу [77, 78], що, у кінцевому результаті, позитивно позначається на міцності цементного каменю і розчинів на його основі.

Володіючи високою питомою поверхнею, окрім прямої хімічної взаємодії з цементом, зола-виносу активно впливає на фізико-хімічні процеси на поверхні розподілу цементне тісто – наповнювач.

Активність золи залежить від вмісту склоподібної фази. Встановлений тісний зв'язок між міцністю розчину, який містить золу, і розрахунковою питомою поверхнею склоподібної фази. Скло в золах можна розглядати [77] як матеріал, що містить аморфіти – утворення, близькі за складом і структурою відповідним кристалічним фазам, але з дуже високою питомою поверхнею, і неупорядковані глиноземисто-кременеземисті прошарки між ними. Здатність склоподібної фази до гідратації і гідролізу можна пояснити субмікроструктурою і високою

проникністю аморфитів, обумовленою наявністю порожнин між іонними угрупованнями. Активність проміжної речовини склоподібної фази визначається співвідношенням глинозему і кремнезему: чим воно більше, тим легше йде процес гідратації зольного скла в лужному і сульфатно-лужному середовищі, у нейтральному середовищі воно стійке. На гідравлічну активність кальцієво-алюмосилікатного скла, яке міститься в золі, позитивно впливають домішки магнію, заліза і деяких інших елементів [76].

Певною гідравлічною активністю в золах, поряд із склоподібною фазою, володіє дегідратована і аморфізована глиниста речовина. Активність залежить від мінералогічного складу глин, яка входить у мінеральну частину палива. З підвищенням у золі вмісту аморфізованої глинистої речовини збільшується її водопотреба [85].

Важливим показником якості золи, визначаючим її активність, є дисперсність і гранулометричний склад. Численні дослідження показують, що прямого зв'язку між цими двома показниками немає.

Для золи характерний значний вміст часток, які мають дрібні замкнуті пори. Вони є результатом спучування розплавленої мінеральної маси газами, що виділяються при дегідратації глинистих мінералів, дисоціації часток вапняку, гіпсу й органічних речовин. Пори можуть досягати 60% об'єму часток золи. Високий вміст мікропор у золі обумовлює і високе значення її дійсної питомої поверхні, вимірювання якої, виконані по адсорбції азоту [86], показали, що вона на порядок вища питомої поверхні цементу. З високою питомою поверхнею золи пов'язані такі її властивості, як адсорбційна здатність, гіроскопічність, гідравлічна активність.

В гідратаційних системах на фізичній взаємодії частинок помітно позначаються "стиснені умови" [87, 88], які відрізняються різким збільшенням об'ємної концентрації твердої фази та переходом частини об'ємної води в плівкову. Створення стиснених умов дозволяє технологічно обґрунтовано знизити водопотребу розчинової суміші. Застосування золи як активного наповнювача при сталості інших параметрів суміші сприяє

утворенню таких умов на коагуляційній стадії структурування.

Наслідком активного впливу золи на процеси гідратації та формування структури цементного каменю є суттєва зміна властивостей бетонних та розчинових сумішей. Введення в розчинову суміш золи, на відміну від інших наповнювачів, не погіршує, а покращує рухомість суміші. Вже першими дослідниками було встановлено, що залежність рухомості суміші від вмісту золи має екстремальний характер, і оптимальний вміст її має бути не більше ніж 30% маси в'язучого [74]. На пластифікуючий ефект золи впливає форма, стан поверхні частинок, їхня дисперсність. Склоподібна поверхня частинок золи зменшує внутрішню тертя та знижує в'язкість розчинової суміші.

Ряд дослідників вважають, що кулеподібні частинки золи можна розглядати як тверді “кулькові підшипники” в суміші, аналогічно тому, як пухирці емульгованого повітря при використанні повітрятягувальних добавок проявляють пластифікуючу дію на розчинову суміш, виконуючи роль своєрідних повітряних “кулькових підшипників”. Більш крупні фракції містять більше незгорівших вуглецевих частинок (НВЧ), які мають підвищене водопоглинання, і частинок неправильної форми [89]. Тому водопотреба при використанні золи підвищеної дисперсності суттєво зменшується.

Підвищення дисперсності зол і зниження їх водопотреби може бути досягнуто відбором з останніх полів електрофільтрів або помолом, який руйнує органомінеральні агрегати. Зменшення водопотреби золи при помолі пояснюється зменшенням кількості капілярної води, яка утримується агрегованими частинками. Це веде до більш значного ефекту, ніж зростання кількості адсорбованої плівкової води у міру збільшення питомої поверхні.

Введення золи сприяє зменшенню водовідділення розчинової суміші [86]. Пластифікуюча і водоутримуюча здатність золи обумовлює перспективність її застосування насамперед у мурувальних розчинах. Розчинові суміші з оптимальною добавкою золи мають досить високу

життєздатність та придатні для транспортування на далекі відстані [76].

Вплив золи на міцність розчинів і бетонів залежить від її властивостей та дисперсності, вмісту та хіміко-мінералогічного складу цементу, віку та умов обробки матеріалів. Для оцінки впливу золи на міцність бетону або розчину введено поняття її “цементуючої ефективності”, яка характеризується коефіцієнтом $K_{ц.е}$ [76]. При прогнозуванні міцності бетонів та розчинів запропоновано знаходити *приведене цементно-водне відношення* за формулою:

$$\left(\frac{Ц}{В} \right)_{пр} = \frac{Ц + K_{ц.е} m_з}{В}, \quad (3.1)$$

де Ц – витрата цементу;

В – витрата води;

$m_з$ – масова частка золи у змішаному в’язучому.

За даними роботи [90] ні вміст вуглецю, ні питома поверхня не можуть бути використані для оцінки $K_{ц.е}$ золи. Золи, які мають найнижчі значення питомої поверхні і різний вміст вуглецю, показали найбільш високі значення коефіцієнта $K_{ц.е}$. З метою визначення значення $K_{ц.е}$ можна встановити для даного цементу експериментальну залежність $R_b = f(Ц/В)$, потім за значеннями міцності матеріалу з добавкою золи визначити $(Ц/В)_{пр}$. У роботі [76] встановлено, що при застосуванні портландцементу Кам’янець-Подільського заводу і золи Ладижинської ТЕС, встановлено, що значення коефіцієнта $K_{ц.е}$ коливається від 0,2 до 0,4.

Визначивши значення $(Ц/В)_{пр}$ та задавшись оптимальним вмістом золи з відомим $K_{ц.е}$, можна знайти необхідне $Ц/В$ золувмісних розчинів чи бетонів і проектувати їх склади.

Більшість дослідників відзначають позитивний вплив підвищення дисперсності золи на міцність цементно-зольних сумішей. Встановлено, що активність золи істотно підвищується при доведенні розмірів її частинок до 5...30 мкм [77, 91].

Характерно, що вплив дисперсності золи на міцність розчину виявляється помітно сильнішим, ніж вплив цементу. Це

обумовлено помітним пластифікуючим ефектом тонких фракцій золи на розчинові суміші, незважаючи на збільшення нормальної густоти золовмісних в'язучих.

Найбільш сприятливий вплив добавки золи на міцність композиційних матеріалів спостерігається при відносно невеликій витраті в'язучих.

Для досягнення високої міцності золовмісних розчинів визначальне значення має хіміко-мінералогічний склад клінкеру. У ранньому віці росту міцності розчину сприяє підвищений вміст у клінкері лугів, які прискорюють хімічну взаємодію золи і цементу [52]. У більш пізньому віці для проявлення пуцоланової реакції золи кращими є цементи з підвищеним вмістом аліту, які при гідролізі утворюють значну кількість $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Доцільною є добавка зол до розчинів на портландцементях із високим вмістом мінералів – силікатів [76].

Зола не лише підвищує когезійну та адгезійну міцність цементної матриці, але й, що дуже важливо для розчинових сумішей, знижує пустотність заповнювача [85, 88, 92].

При деякому відставанні міцності золовмісних розчинів і бетонів у ранні строки багатьма авторами показано, що в період 28...180 діб інтенсивність росту їх міцності при стиску приблизно така ж або вища, ніж без добавки золи.

У деяких роботах відзначається, що при тривалому твердінні інтенсивно росте міцність золовмісних розчинів при розтягу та згині. Зразки у вигляді стержнів і брусків, вирізаних з дослідної розчинової кладки, показали міцність при згині золовмісних розчинів через 3 міс. – 80, а через 10 років – 150% міцності контрольних зразків. У розчинів із золою, так само як і з іншими активними мінеральними добавками, більш високе відношення міцності на розтяг до міцності на стиск [77].

Багато досліджень містять суперечливі дані про модуль пружності, повзучість і усадку при висиханні золовмісних розчинів і бетонів [76, 90, 93]. Наприклад, у роботі [52] стверджується, що заміщення частини цементу золою приводить до зменшення усадочних деформацій бетону. Зменшення усадки пояснюється тим, що зола адсорбує з цементу розчинні луги й утворює стійкі, нерозчинні алюмосилікати. У роботі [91] було

показано, що усадка при висиханні призм із бетону без добавок і бетону з добавкою золи в основному однакова через 400 діб, хоча в початковий термін є тенденція до її зростання при введенні золи.

Зола сприяє підвищенню сульфатостійкості цементних розчинів так само, як і інші активні мінеральні добавки.

У досліджах В.В. Стольникова [82] коефіцієнт стійкості цементу після 6 місячного впливу розчину сульфатів складав 0,33, у той час як при додаванні золи він перевищував 1, що свідчить про повну відсутність корозії зразків. Найкращі результати відзначені для бетонів при введенні зол із найбільшим вмістом $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, тобто найбільш кислих за хімічним складом.

За рекомендацією НДІЗБ [79] при використанні в розчинів суміші реакційноздатних заповнювачів, які містять опал, халцедон, кремнієві сланці, вулканічні туфи і т.п., зола може бути застосована лише в тому випадку, якщо сумарний вміст лужних оксидів у в'язучому у перерахунку на Na_2O буде не більшим 0,6% за масою. У той же час у роботі [76] верхня допустима межа можливого сумарного вмісту лужних оксидів у цементно-зольному в'язучому рекомендується 1,5%.

Як і інші активні мінеральні добавки зола-виносу може викликати деяке зменшення морозостійкості розчинів і бетонів. Встановлено, що при дозуванні золи 30...40% від маси змішаного в'язучого спостерігається різке збільшення капілярного підсосу і водопоглинання, особливо в початковий строк випробувань, що свідчить про підвищення абсолютного об'єму відкритих капілярних пор, заповнення яких водою відбувається під дією сил гідростатичного тиску; при цьому загальна пористість хоча і зростає, але значно менше. Дослідження показали, що при заміні цементу золою істотно зменшується об'єм контракційних пор. По мірі зростання вмісту золи співвідношення між капілярною і контракційною пористістю змінюється. Капілярне водопоглинання з додаванням до цементу золи підвищується приблизно на 10...20% на кожні 10% добавки золи.

Ступінь зниження морозостійкості розчинів і бетонів при введенні в них золи різна і залежить від її характеристик. До

значних розбіжностей основних фізико-механічних властивостей цементно-зольних композицій, у тому числі і морозостійкості, приводять неоднорідність складу і властивостей золи.

Значне підвищення морозостійкості золовмісних розчинів і бетонів досягається введенням добавок повітрявтягуючих ПАР.

Зола, яку застосовують для мурувальних розчинів, повинна відповідати наступним вимогам [94]:

- втрата маси при прожарюванні (в.м.п.), %, не більше, у золі:
 - антрацитовій (А).....25;
 - кам'яновугільній (КВ).....15;
 - буровугільній (Б).....5;
- вміст сірчанних і сірчаноокислих з'єднань у перерахунку на SO_3 , % за масою, не більше.....5;
- вміст лужних оксидів у перерахунку на Na_2O , % за масою, не більше.....3;
- питома поверхня, m^2/kg , не менше.....150;
- залишок на ситі № 008, % за масою не більше.....30.

У цементних розчинах оптимальний вміст золи рекомендується 100 – 200 kg/m^3 , при цьому в «пісних» малоцементних розчинах він складає 80 – 125% маси цементу, у більш «жирних» – 40 – 50%. При витраті цементу більше 400 kg/m^3 введення золи до складу розчину малоефективне. Тонкодисперсна зола-виносу може застосовуватись замість частини цементу і піску. Крупнодисперсну золу раціонально застосовувати замість частини піску без зміни витрати цементу.

При повній заміні піску золою підвищуються деформації усадки в часі і деформації при попереминому зволоженні і висушуванні. Вони в 2 – 3 рази вищі, ніж у цементно-піщаних розчинів [76, 18].

Ряд дослідників показали, що ефективність добавки золи-виносу в цементних розчинах і бетонах суттєво збільшується при веденні добавок ПАР. Як показано в монографії [95] введення ПАР може розглядатись як один із способів активації зольного наповнювача в розчинах і бетонах. При виборі ПАР слід враховувати хімічну природу як наповнювача, так і в'язучого.

Необхідною умовою ефективності ПАР є їх здатність до хемосорбційної взаємодії з поверхнею часточок наповнювача. В загальному випадку для мінеральних наповнювачів кислотного характеру найбільш ефективними є ПАР катіоноактивного типу, а основного – аніоноактивні.

На сьогодні відомий ряд експериментальних даних, які показують ефективність спільного введення в бетонні суміші золи-виносу і суперпластифікаторів (СП) [5, 96]. За механізмом дії більшість СП можна віднести до другої і третьої груп ПАР за класифікацією П.О. Ребіндера [6]. Загальним для них є здатність до пептизації (дефлокуляції) агрегованих флокул цементу. Імобілізована у флокулах вода звільняється і сприяє розрідженню цементного тіста. У порівнянні з традиційними пластифікаторами, наприклад, лігносульфанатного типу СП мають більшу довжину вуглецевого ланцюга і відповідно більшу адсорбційну здатність [97]. Значний вплив на механізм дії СП у бетонних і розчинових сумішах мають колоїдно-хімічні явища на межі розподілу фаз і величина дзета-потенціалу [98...100].

Крім зменшення міжфазної поверхневої енергії при створенні адсорбційно активного середовища, що позитивно позначається на величині адгезійних контактів, ПАР також виконують дефлокуючий вплив на високодисперсні золи, схильні до агрегування [101].

Показана можливість модифікації розчинів і бетонів, наповнених золою й іншими порошками, полімерними добавками. У цьому напрямку виконані В.І. Соломатовим і його школою [102].

Робоча гіпотеза, покладена в основу виконаних досліджень, результати яких наведені нижче, полягає в тому, що отримання сухих розчинових сумішей із зниженою витратою цементу та покращеними фізико-механічними властивостями можна здійснити шляхом введення у цементно-піщані суміші золи виносу і композиційних поліфункціональних модифікаторів (ПФМ) – які містять ПАР, полімерні та високоактивні мінеральні добавки.

3.2. Характеристика вихідних матеріалів

Вихідними матеріалами при проведенні досліджень, що виконані на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП слугували портландцемент Здолбунівського ВАТ “Волинь-цемент”, зола-виносу Бурштинської ТЕС, кварцовий пісок з родовищ Славутського р-ну Хмельницької обл., мікрокремнезем – відходи виробництва феросиліцію Стахановського заводу феросплавів. У якості хімічних модифікаторів використовували суперпластифікатор (СП) “Поліпласт”, повітровтягувальну добавку “Міх-DH”, водоутримуючу добавку – ефір целюлози торгової марки Tylose SE та редиспергований полімерний порошок "Mowilith".

Портландцемент

Портландцемент ВАТ “Волинь-цемент” є типовим середньоалюмінатним цементом, найбільш характерним для сучасної вітчизняної цементної промисловості [103]. З огляду на те, що об’єктом досліджень були цементно-зольні сухі суміші і розчини, для досліджень був обраний портландцемент типу ПЦ-I марки М500. Вибір низько- і середньоалюмінатних цементів пояснюється не тільки їх розповсюдженістю. Перехід на високоалюмінатні цементи ($C_3A > 7\%$) потребує збільшення дозування СП майже в 2 рази для отримання рівнорухливих бетонних і розчинових сумішей [104].

Мінералогічний склад клінкеру був наступний: C_3S – 57,10%. C_2S – 21,27%, C_3A – 6,87%, C_4AF – 12,19%. Хімічний склад вихідних матеріалів наведений у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Хімічний склад вихідних матеріалів

Назва матеріалу	Вміст оксидів, %									
	п.п.п.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO _B
Клінкер	-	21,80	5,32	4,11	66,80	0,95	0,63	0,54	0,42	-
Зола-виносу	5,1	84,5			2,1	2,0	2,3	1,2	2,5	
Мікрокремнезем	1,8	92,15	0,90	0,74	1,10	0,42	0,87	1,08	-	

Для вивчення впливу питомої поверхні золи домелювали в лабораторному кульовому млині.

Фізичні властивості золи-виносу наведені в табл. 3.2. Питому поверхню золи вимірювали методом повітряпроникності, а гранулометричний склад – седиментаційним аналізом.

Таблиця 3.2

Фізичні властивості складу золи-виносу

Показники	Зола немелена	Зола домелена
Питома поверхня, м ² /кг	290	455
Вміст фракцій, мкм, %		
до 20	17,8	29,7
20...40	35,9	40,25
40...80	32,6	27,3
>80	12,9	3,3
Густина, кг/м ³		
- дійсна	2430	2460
- насипна	1100	965
Нормальна густина, %	26,0	28,5
Активність за поглинанням СаО, мг/г	36,3	52,1

Крім золи у складі ПФМ застосовували ультрадисперсні відходи виробництва феросиліцію Стаханівського заводу феросплавів, що виділяються у вигляді конденсованої аерозолі та уловлюється системами сухого газоочищення плавильних печей. Усереднений хімічний склад проб мікрокремнезему наведено у табл. 3.1. Деякі характерні його показники наведені нижче:

- насипна густина 250 кг/м³,
- середній розмір частинок – 20 мкм,
- питома поверхня – 2300 м²/кг,
- активність із поглинання СаО – 236 мг/г.

У дослідженнях були використані порошкоподібні суперпластифікатори “Поліпласт” модифікацій СП-1 та СП-3.

Суперпластифікатори є продуктами конденсації нафталінсуль-фокислот і формальдегіда, що містить суміш

олігомерів і полімерів [108]. Вміст активної речовини у СП складав не менше 69%, зольність не більше 38%, рН 2,5% -го водного розчину – 7...9. Водний розчин суперпластифікатора не змінював своїх властивостей при нагріванні до 85° С. При заморожуванні до -40° С та наступному повному відтаюванні властивості розчину також зберігалися.

Як повітровтягувальну добавку (ПД) – замітник вапна в мурувальних сумішах, використовували суху порошкоподібну добавку “Mіx-DH” – суміш синтетичних повітровтягувальних компонентів та натрієвих солей абієтинової кислоти. Дозування добавки при введенні в мурувальні розчини – 0,02...0,05% маси в’язучого.

У якості водоутримуючої добавки використовували ефіри целюлози (ЕЦ) – метилгідроксиетилцелюлозу Tylose MN 15002P6 – продукт заміщення водневих атомів гідроксильних груп целюлози на спиртові залишки, отриманий в результаті процесу активізації целюлози гідроксидом натрію та подальшої її етерифікації метилхлоридом та окисом етилену. В’язкість 2-% ного розчину 14000...19000 МПа·с, вміст активної речовини не менше 91,5%, вміст NaCl не більше 1,5%.

У дослідженнях був використаний редиспергований полімерний порошок (РПП) Mowilith Pulwer LDM 2080P виробництва німецької фірми "Clariant GmbH" на основі сополімерів вінілацетату з вінілверсататами у вигляді порошку, що мав розмір часток 10...40 мкм з насипною густиною 0,45...0,60 г/см³. Водневий показник 50%-вого водного розчину РПП знаходився в межах 5...8, вміст золи – 8...12%.

Як заповнювачі сухих будівельних сумішей використовували кварцовий пісок з $M_{кр} = 1,42$, вмістом пилоподібних і глинистих домішок 1,7%.

3.3. Реологічні та структурно-механічні властивості цементно-зольних паст

Пасты з композиційними органічними ПФМ

Комплекс будівельно-технічних властивостей розчинових сумішей визначається перш за все їх реологічними властивостями.

Відповідно до сучасних теоретичних уявлень нормальну густоту ($K_{н.г.}$), незважаючи на певну умовність пенетрометричного методу її визначення на приладі Віка, можна вважати важливим фізичним параметром цементних паст. За І.М. Ахвердовим [105] $K_{н.г.}$ характеризує “міцнозв’язану структуру цементного гелю з щільним просторовим упакуванням обводнених часток твердої фази”. Такій структурі відповідають гранична напруга зсуву $\tau_0=265$ Па, коефіцієнти в’язкості $\mu_B=90$ і внутрішнього тертя $f_T = 1.27$. Нормальна густота лінійно пов’язана з максимальною молекулярною вологоємкістю і граничною водоутримуючою здатністю цементного тіста і залежить від мінералогічного складу і дисперсності цементів, кількості і виду введених добавок.

На першому етапі досліджень визначали вплив вмісту добавок і золоцементного відношення на нормальну густоту цементних паст. Результати досліджень наведені в табл. 3.3. З них випливає, що введення золи-виносу збільшує нормальну густоту цементу, навіть у тому випадку, коли $K_{н.г.}$ золи-виносу менший ніж $K_{н.г.}$ портландцементу. Подібні результати отримані і в інших дослідженнях. Так у дослідах З.Б. Ентіна й Е.Т. Яшиної [106] введення 30% золи збільшило нормальну густоту цементу з 24,5 до 29%. Введення поліфункціональних модифікаторів (ПФМ) змінює $K_{н.г.}$ цементних паст як без добавки золи, так і при вмісті її до 70% маси цементу.

Застосування ПФМ, що містить суперпластифікатор СП-3 та повітрявтягувальну добавку (ПД) у цементних і цементно-зольних пастах дозволило змінити їх водопотребу на 13...19%. За І.М. Ахвердовим [105] мінімальна кількість води, яка необхідна для утворення коагуляційної структури, відповідає максимальній вологоємкості цементу ($K_{м.в.}$), $K_{м.в.}=0,876 K_{н.г.}$. При $V/C = K_{м.в.}$ вода

міститься переважно в сольватних оболонках. При введенні ПФМ, який містять суперпластифікатор, може досягатися умова $K_{н.г} < K_{м.в}$, тобто розріджуючий ефект призводить до істотного зниження товщини сольватних оболонок і утворення додаткової кількості вільної води. Водовміст цементного тіста при $K_{н.г}$, який забезпечується введенням достатньої кількості суперпластифікатора, наближається до теоретично необхідного для зв'язування цементом при його повній гідратації.

Таблиця 3.3

Вплив $K_{н.г}$ золи і золоцементного відношення на нормальну густоту золоцементних паст

№ з/п	З/Ц	Вміст ПФМ (СП-3 +ПД) у % маси цементу	$K_{н.г}$ золоцементних паст	№ з/п	З/Ц	Вміст ПФМ (СП-3 +ПД) у % маси цементу	$K_{н.г}$ золоцементних паст
Зола з $K_{н.г.}=27,2\%$				Зола з $K_{н.г.}=23,4\%^*$			
1		-	27,7	10		-	26,1
2	0,1	0,3+0,03	23,2	11	0	0,3+0,03	22,7
3		0,7+0,03	22,2	12		0,7+0,03	21,6
4	0,4	-	28,9	13	0,1	-	27,4
5		0,3+0,03	25,1	14		0,3+0,03	23,3
6		0,7+0,03	23,4	15		0,7+0,03	22,7
7	0,7	-	29,2	16	0,4	-	28,1
8		0,3+0,03	25,4	17		0,3+0,03	24,5
9		0,7+0,03	23,6	18		0,7+0,03	22,8
				19	0,7	-	28,9
				20		0,3+0,03	25,1
				21		0,7+0,03	23,4

Примітка: золу з $K_{н.г.}=23,4\%$ отримували домолом до питомої поверхні $390 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Для вивчення цементно-зольних паст із добавками ПФМ використовували ротаційний віскозиметр РВ-8М. Важливою перевагою ротаційної реометрії є можливість реалізації з її допомогою практично необмежених деформацій зсуву з заданою

швидкістю [107, 108]. Прилад РВ-8М відноситься до ротаційних напівсферо-циліндричних віскозиметрів, основною особливістю яких є можливість врахування донних і кінцевих ефектів. Досліджували пасті з В/Ц=0.3 при визначенні реологічних властивостей через 5 хв. після замішування. В'язкість паст (η) визначали за формулою:

$$\eta = k \frac{P - P_0}{N} \tau, \quad (3.2)$$

де P_0 – навантаження холостого ходу приладу ($P_0=12,4$ г).

k – константа приладу;

P – вага вантажів;

N – число обертів;

τ – час оберту;

Частота обертання циліндра змінювалася від 27с^{-1} до 430с^{-1} .

Експерименти по визначенню нормальної густоти та ефективної в'язкості паст були реалізовані відповідно до типового трьохрівневого плану B_3 . Алгоритмізовані експерименти виконували з використанням ПФМ двох типів, портландцементу і золи. Умови планування експериментів наведені в табл. 3.4.

Отримані після статистичного опрацювання рівняння регресії нормальної густоти та ефективної в'язкості цементно-зольних паст наведені в табл. 3.5. Статистичний аналіз показав їх адекватність при 95% довірчої ймовірності. Отримані рівняння можна вважати математичними моделями властивостей цементно-зольних паст в обраному факторному просторі [109]. Можна відзначити, що отримані моделі при різних наборах значень факторів описують зміни нормальної густоти та в'язкості як цементних ($X_3= 1$), так і цементно-зольних паст ($X_3> -1$) при введенні добавок ПФМ ($X_1> -1$) і без них ($X_1= 1$). При цьому область варіювання фактора X_2 дозволяє прослідкувати вплив на досліджувані властивості широкої області складів ПФМ, включаючи і крайні склади, коли ПФМ представлений тільки одним компонентом.

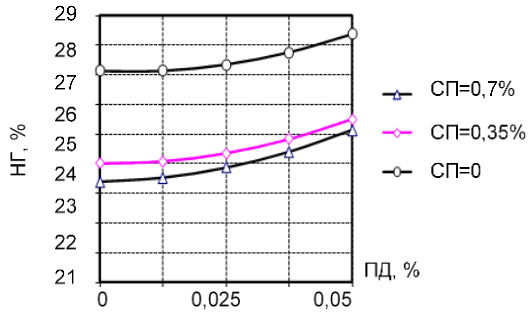
Таблиця 3.4

Умови планування експериментів при дослідженнях нормальної густоти і ефективної в'язкості цементно-зольних паст з добавками ПФМ

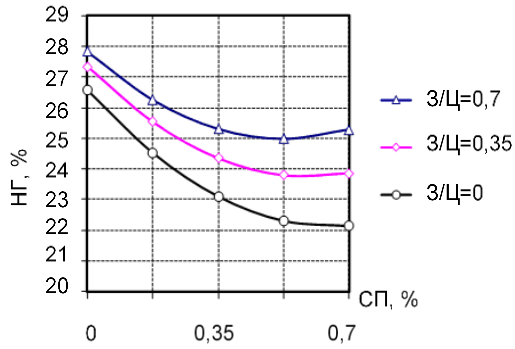
Технологічні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Пасти з добавкою ПФМ ₁ (СП-3 + ПД)					
Вміст повітрявтягувальної добавки, % маси цементу	X ₁₍₁₎	0	0,025	0,05	0,025
Вміст суперпластифікатора СП-3, % маси цементу	X ₂	0	0,35	0,7	0,35
Золо-цементне відношення	X ₃	0	0,35	0,7	0,35
Пасти з добавкою ПФМ ₂ (СП-3 + ЕЦ)					
Вміст водоутримуючої добавки (ЕЦ), % маси цементу	X _{1(II)}	0	0,15	0,3	0,15
Вміст суперпластифікатора СП-3, % маси цементу	X ₂	0	0,35	0,7	0,35
Золо-цементне відношення	X ₃	0	0,35	0,7	0,35

Аналіз отриманих математичних моделей (3.3...3.6) показав, що як у цементних, так і в цементно-зольних пастах найбільше зниження НГ і в'язкості досягається при переважанні в складі ПФМ суперпластифікатора СП-3 (рис. 3.1...3.4). При цьому найбільше зменшення в'язкості (майже у 3 рази) досягається для цементних паст при вмісті СП-3, рівному 0,7% маси цементу. Для цементно-зольних паст при такому ж вмісті суперпластифікатора в'язкість зменшується лише в 1,5...2 рази.

а)



б)



в)

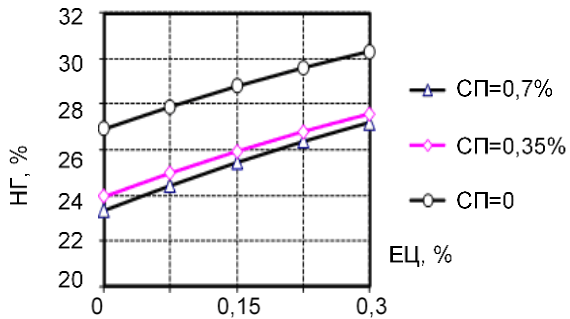


Рис. 3.1. Залежність нормальної густоти цементно-зольних паст від складу ПФМ₁ (а, б), ПФМ₂ (в) та золоцементного відношення

Таблиця 3.5

Експериментально-статистичні моделі нормальної густоти і ефективної в'язкості цементно-зольних паст з добавками ПФМ

Поліфункціональний модифікатор (ПФМ)	Властивість паст	Рівняння регресії
ПФМ ₁ (суперпластифікатор СП-3 + повітрявтягувальна добавка (ПД))	НГ, %	$\begin{aligned} \text{НГ}_{(1)} = & 24,3 + 0,75X_{1(1)} - 1,74X_2 + 1,10X_3 + \\ & + 0,404X_{1(1)}^2 + 1,254X_2^2 - 0,146X_3^2 + \\ & + 0,125X_{1(1)}X_2 + 0,475X_2X_3 \end{aligned} \quad (3.3)$
	$\eta_{\text{еф.}}$, 10 ⁻¹ Па·с (В/В'язж=0,3)	$\begin{aligned} \eta = & 11,0 - 1,75X_{1(1)} - 5,87X_2 + 0,72X_3 + \\ & + 3,57X_{1(1)}^2 + 3,47X_2^2 + 1,92X_3^2 - \\ & - 1,73X_{1(1)}X_2 + 0,725X_{1(1)}X_3 - \\ & - 0,45X_2X_3 \end{aligned} \quad (3.4)$
ПФМ ₂ (суперпластифікатор СП-3 + водоутримуюча добавка ЕЦ "Tylose")	НГ, %	$\begin{aligned} \text{НГ}_{(2)} = & 25,9 + 1,82X_{1(II)} - 1,67X_2 + 0,89X_3 - \\ & - 0,172X_{1(II)}^2 + 1,18X_2^2 - \\ & - 0,222X_3^2 + 0,11X_{1(II)}X_2 - \\ & - 0,24X_{1(II)}X_3 + 0,94X_2X_3 \end{aligned} \quad (3.5)$
	$\eta_{\text{еф.}}$, 10 ⁻¹ Па·с (В/В'язж=0,3)	$\begin{aligned} \eta = & 16,9 + 4,37X_{1(II)} - 7,44X_2 + 0,45X_3 - \\ & - 1,95X_{1(II)}^2 + 6,20X_2^2 - 3,45X_3^2 - \\ & - 2,65X_{1(II)}X_2 + 0,525X_{1(II)}X_3 - \\ & - 0,75X_2X_3 \end{aligned} \quad (3.6)$

Повітрявтягувальна добавка дещо збільшує нормальну густоту, однак зменшує в'язкість паст, хоча і значно менше, ніж

суперпластифікатор. Сумісне введення СП-3 і повітрявтягувальної добавки викликає близький до адитивного ефект зменшення в'язкості цементно-зольних паст.

Добавка Tylose, будучи загусником, викликає суттєвий ефект збільшення як $K_{н.г.}$, так і в'язкості цементно-зольних паст. Привертає до себе увагу наявність певних ефектів взаємодії впливу компонентів ПФМ. Зокрема, із збільшенням вмісту ЕЦ вплив суперпластифікатора СП-3 проявляється сильніше.

Зола-виносу при постійному В/Ц, збільшуючи загальну концентрацію в пастах дисперсної фази і зменшуючи водов'язуче відношення при $В/Ц = \text{const}$, закономірно викликає підвищення в'язкості. Проте цей ефект значною мірою згладжується з введенням добавок ПФМ, і особливо при переваженні в останніх суперпластифікатора. У рівняннях (3.3, 3.6), відмічений висновок підтверджується достатньо сильним ефектом взаємодії факторів X_1 і X_3 та X_2 і X_3 .

Вплив золацементного відношення на в'язкість паст менш суттєвий, ніж вплив компонентів ПФМ, і носить екстремальний характер. Добавки ПАР, руйнуючи цементні і зольні флокули, приводять до помітного зменшення в'язкості як при низьких, так і при високих значеннях З/Ц.

Для забезпечення достатньої "життєздатності" розчинових сумішей вирішальне значення має характер зміни в'язкості цементно-водної матриці в часі. Вивчення зміни в'язкості у часі проводили на характерних цементних і цементно-зольних пастах із добавками ПФМ різного складу при температурі $20 \pm 2^\circ \text{C}$. Результати дослідів наведені на рис. 3.3, 3.4. З них випливає, що, маючи при $В/Ц = \text{const}$ істотно нижчу в'язкість, пасти, які містять добавку СП-3, вже через 35 хв майже втрачають цю перевагу. Наявність добавок ЕЦ і ПД у складі ПФМ хоча і збільшує початкову в'язкість паст, проте вже через 30 хв вона практично вирівнюється. Комбінація двох добавок у складі ПФМ дозволяє забезпечити як достатньо низьку початкову в'язкість паст, так і суттєво сповільнити темп її росту у часі.

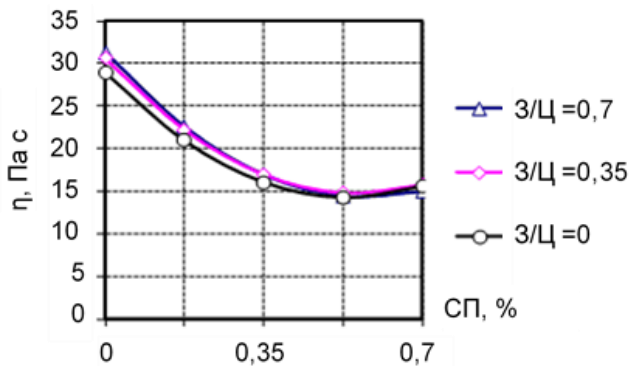


Рис. 3.2. Залежність ефективної в'язкості цементно-зольних паст від вмісту компонентів ПФМ₂ та золю-цементного відношення

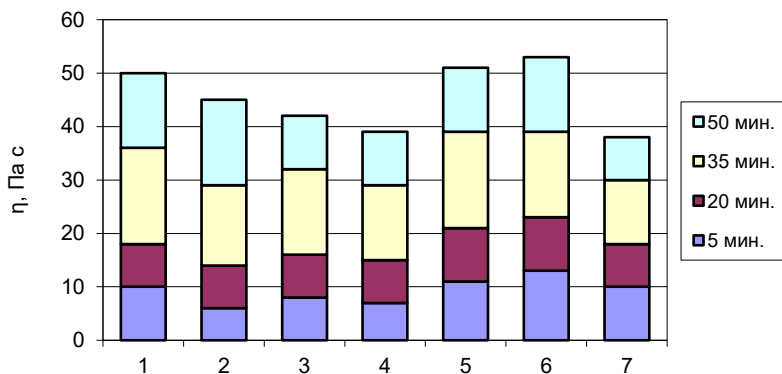


Рис. 3.3. Вплив тривалості витримки на в'язкість цементних паст ($V/C = 0,3$):

- 1 – цементна паста без добавки; 2 – СП-3 – 0,7%; 3 – ПД – 0,03%;
- 4 – СП-3 – 0,7% + ПД – 0,03%;
- 5 – ЭЦ – 0,1%; 6 – ЭЦ – 0,3%;
- 7 – СП-3 – 0,7% + ЭЦ – 0,3%

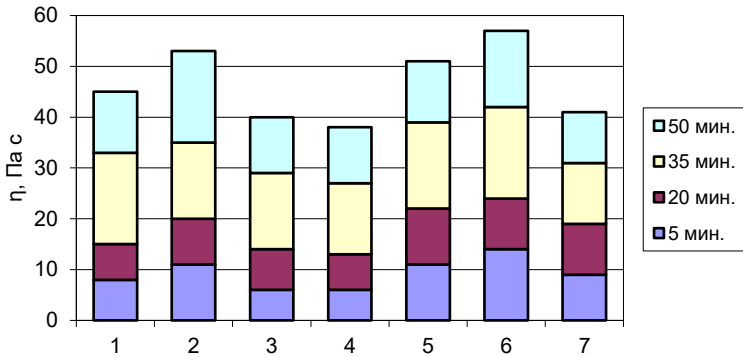


Рис. 3.4. Вплив тривалості витримки на в'язкість цементно-зольних паст ($V/V_{ж} = 0,3$):

- 1 – цементно-зольна паста без добавки ($Z/C=0,35$); 2 – то же ($Z/C=0,7$);
 3 – $Z/C=0,35$, СП-3 – 0,7%; 4 – $Z/C=0,35$, СП-3 – 0,7% + ПД – 0,03%;
 5 – $Z/C=0,35$, ЭЦ – 0,1%; 6 – $Z/C=0,35$, ЭЦ – 0,3%;
 7 – $Z/C=0,35$, СП-3 – 0,7% + ЭЦ – 0,3%

Пасты з композиційними органо-мінеральними ПФМ

Як компоненти органо-мінеральних ПФМ цементно-зольних паст використовували суперпластифікатор СП-3 та високодисперсні кремнеземисті матеріали – мікрокремнезем (МК) та домелену золу (ЗД). Крім того, досліджували вплив добавки полімеру, що реліквірується (РПП).

Для встановлення впливу основних факторів складу на реологічні властивості цементно-водних паст, наповнених ПФМ, які вміщують тонкодисперсні кремнеземисті добавки (КД), виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до типового плану Na_5 . Умови планування експерименту наведені в табл. 3.6.

Вибір в якості планованих трьох концентраційних факторів ($X_1...X_3$), представлених об'ємними співвідношеннями, дозволяє: по-перше, дослідити вплив на рухомість 4 параметрів складу – витрат високодисперсної кремнеземистої добавки (КД, до складу якої входить мікрокремнезем (МК) чи домелена зола (ЗД), золиносу, цементу і води (за умови $V_{кд}+V_3+V_ц+V_в=1$), по-друге, застосувати поліструктурний метод технологічного аналізу,

враховуючи, що кожний наступний фактор характеризує більш складний структурний рівень елементів розчинової суміші ніж попередній.

Таблиця 3.6

Умови планування експериментів при дослідженні ефективної в'язкості цементно-зольних паст

Фактори			Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Назва	Натуральний вигляд	Кодовий вигляд	-1	0	+1	
Об'ємна концентрація кремнеземистої добавки (МК, ЗД) в ПФМ	V ₁	x ₁	0	0,5	1	0,5
Об'ємна концентрація ПФМ в наповненому в'язучому	V ₂	x ₂	0,2	0,45	0,7	0,25
Об'ємна концентрація наповненого в'язучого у водній пасті	V ₃	x ₃	0,6	0,65	0,7	0,05
Вміст суперпластифікатора, % маси цементу	СП	x ₄	0	0,35	0,7	0,35
Вміст редиспергованого полімеру, % маси цементу	РПП	x ₅	0	1,5	3,0	1,5

Перехід від об'ємних співвідношень до об'ємних і масових витрат окремих компонентів на 1 м³ розчинової суміші здійснюється за формулами:

$$\begin{aligned} V_{\text{МК}} &= X_1 X_2 X_3; \\ \text{МК (ЗД)} &= V_{\text{МК}} \rho_{\text{МК}} (\rho_{\text{ЗД}}); \\ V_3 &= (1 - X_1) X_2 X_3; \\ z &= V_3 \rho_3; \\ V_{\text{Ц}} &= (1 - X_2) X_3; \\ \text{Ц} &= V_{\text{Ц}} \rho_{\text{Ц}}; \\ V_{\text{В}} &= 1 - X_3; \\ \text{В} &= V_{\text{В}} \rho_{\text{В}}; \end{aligned}$$

де $V_{\text{МК}}$, V_3 , $V_{\text{Ц}}$, $V_{\text{В}}$ – відповідно об'єми мікрокремнезему, золи, цементу та води, л/м³;

МК, з, ц, в – їх витрата по масі, кг/м³.

При розрахунках приймали $\rho_{\text{МК}} = 2100$ кг/м³, $\rho_3 = 2200$ кг/м³, $\rho_{\text{Ц}} = 3100$ кг/м³, $\rho_{\text{В}} = 1000$ кг/м³.

У результаті обробки експериментальних даних отримані рівняння ефективної в'язкості в Па·с, адекватні при 95%-вій довірчій імовірності для паст з добавкою:

– ПФМ, що включає мікрокремнезем (МК):

$$\begin{aligned} \eta = 210,5 + 121,4x_1 + 54,6x_2 + 85,3x_3 - 105,3x_4 - 38,3x_5 + \\ 55,3x_1^2 + 31,3x_2^2 - 9,4x_3^2 + 15,4x_4^2 - 12,7x_5^2 - 28,5x_1x_4 - \\ 11,5x_4x_5 \end{aligned} \quad (3.7)$$

– ПФМ, що включає домелену золу (ЗД):

$$\begin{aligned} \eta = 160,3 + 80,5x_1 + 47,1x_2 + 64,2x_3 - 92,6x_4 - 29,4x_5 + \\ 47,8x_1^2 + 28,6x_2^2 - 8,1x_3^2 + 14,4x_4^2 - 12,5x_5^2 - 25,3x_1x_4 - \\ 18,5x_2x_4 - 12,1x_4x_5 \end{aligned} \quad (3.8)$$

У дослідженому діапазоні складів в'язкість паст, як показує аналіз моделей, змінюється в широких межах: від 26,7 Па·с до

734 Па·с, тобто у 27 раз для ПФМ з МК та від 29,8 Па·с до 575,8 Па·с (у 19,3 рази) для ПФМ із ЗД. За впливом на величину в'язкості фактори можна проаранжувати в ряд $x_1 > x_4 > x_3 > x_2 > x_5$.

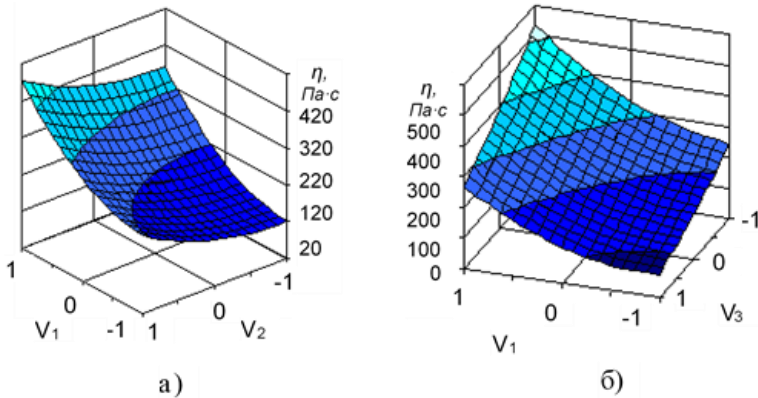


Рис. 3.5. Поверхні відгуку в'язкості паст з ПФМ, що містять МК:
 а – $X_3 = 0,65$; СП = 0,35%; РПП = 1,5%; б – $X_2 = 0,45$; СП = 0,35%;
 РПП = 1,5%; (табл. 3.6)

При додаванні дисперсної кремнеземистої добавки до зольного наповнювача в'язкість паст зростає нерівномірно в міру збільшення об'ємної концентрації добавки в ПФМ (x_1). Так, якщо при збільшенні x_1 до 0,5 для паст, що вміщують МК в'язкість зростає на 66 Па·с, то при збільшенні від x_1 0,5 до 1 – на 177 Па·с. При $x_1 < 0,5$ запобігти збільшенню в'язкості паст можна при вмісті суперпластифікатора у воді замішування до 0,35%. Повна заміна золи-виносу мікрокремнеземом чи домеленою золою не компенсується навіть при подвоєному вмісті суперпластифікатора, хоча його вплив збільшується в міру росту об'ємної концентрації кремнеземистої добавки. Полімерний компонент також знижує в'язкість цементно-зольних паст, хоч і набагато слабше, ніж суперпластифікатор.

Про можливість регулювати в'язкість цементно-зольних паст з добавками ПФМ, можна робити висновки за поверхнями відгуку, отриманих аналізом моделей (3.7) та (3.8) (рис. 3.5, 3.6).

З них випливає, що основним технологічним прийомом зниження в'язкості цементно-зольних систем, які містять кремнеземистий компонент, є замішування їх водою, яка містить відповідну кількість суперпластифікатора.

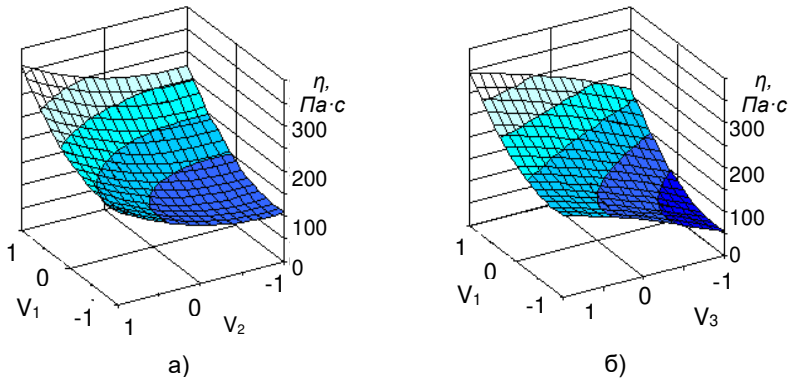


Рис. 3.6. Поверхні відгуку в'язкості паст з добавкою ПФМ, що містить СП та ЗД:

а – $X_3=0,65$; СП=0,35%; РПП=1,5%;
б – $X_2=0,45$; СП=0,35%; РПП=1,5%

З наведених у табл. 3.7 даних випливає, що введення композиційних наповнювачів у поєднанні із суперпластифікатором (СП) та редиспергованим полімерним порошком (РПП) дозволяє істотно зменшити нормальну густоту і, відповідно, водопотребу цементних паст.

Експериментальні дані, наведені в табл. 3.7, достатньо добре апроксимуються експоненціальною залежністю:

$$K_{HH} = K_{HH}^0 e^{-bx}, \quad (3.9)$$

де K_{HH}^0 – нормальна густота цементного тіста;

x – вміст ПФМ у % від маси цементу;

b – константа, яка визначається складом ПФМ.

Таблиця 3.7

Нормальна густина (НГ) наповнених цементно-водних паст

Склад паст				НГ, % паст з	
$X_1 = \frac{V_{\text{КД}}}{V_{\text{КД}} + V_3}$	$X_2 = \frac{V_{\text{КД}} + V_3}{V_{\text{КД}} + V_3 + V_{\text{Ц}}}$	Вміст СП, % маси цементу	Вміст РПП, % маси цементу	мікрокремнеземом	домеленою золюю
0	0	0	0	26,5	26,5
1	0,2	0	0	30,3	27,8
1	0,5	0	0	36,3	32,1
0	0,2	0	0	23,7	23,1
0	0,5	0	0	24,8	24,5
1	0,2	0,35	1,5	27,4	25,5
1	0,2	0,7	1,5	26,5	25,5
1	0,5	0,35	3,0	32,1	30,6
1	0,5	0,7	3,0	29,4	27,8
0,2	0,2	0	3,0	28,1	26,6
0,2	0,2	0,35	3,0	25,1	24,5
0,2	0,2	0,7	3,0	23,6	23,2
0,2	0,5	0,35	1,5	24,3	23,8
0,5	0,2	0,35	1,5	26,8	25,1
0,5	0,2	0,7	1,5	24,9	23,1
0,5	0,5	0,35	1,5	27,7	25,6
0,5	0,5	0,7	1,5	25,4	24,8

Примітки: 1. $V_{\text{КД}}$, V_3 , $V_{\text{Ц}}$ – відповідно об'єми кремнеземистої добавки (МК чи ЗД), золи-виносу та цементу. 2. Об'ємна концентрація наповненого в'язучого у водній пасті V_3 для всіх паст дорівнює 0,65.

3.4. Особливості структуроутворення та гідратації модифікованих цементно-зольних паст

Відповідно до сучасних теоретичних уявлень цементно-водні дисперсії в процесі структуроутворення, по мірі твердіння, утворюють групу коагуляційно-кристалізаційних структур [6, 110]. Характерним проявом формування і зміцнення коагуляційної структури є тужавлення цементних паст. Вплив ПАР на тужавлення цементного тіста обумовлений особливостями адсорбційного механізму їхньої дії, підвищенням дифузійного опору розчиненню зерен цементу, стабілізацією цементно-водяної суспензії і, як результат, гальмуванням швидкості гідратації [6]. Суперпластифікатори та інші органічні добавки, які відносяться до групи ПАР та полімерів, за наявними літературними даними, як правило, сповільнюють тужавлення цементних паст [69, 111].

Літературні дані щодо впливу золи на строки тужавлення цементних паст суперечливі. Так, П.К. Мехта вважає [114], що низькокальцієві золи, особливо з високим вмістом вуглецю, уповільнюють тужавлення портландцементу, у той час, як висококальцієві з низьким вмістом вуглецю і підвищеним вмістом реакційноздатних складових можуть поводитись протилежним чином. У іншій роботі [18] відзначається можливість прискорення тужавлення при підвищених дозуваннях золи-виносу. Очевидно, вплив золи на тужавлення цементу повинен залежати як від вмісту незгорівших часток, так і від дисперсності золи, а також від вмісту в ній лужних сполук.

Тужавлення цементного тіста супроводжується збільшенням об'єму продуктів гідратації з відповідним зменшенням відстані між частинками. Виникаючі сили когезії, пропорційні числу частинок, які дотикаються одна до другої [113].

Представляло інтерес вивчити кінетику тужавлення цементно-зольних паст при спільному введенні добавок в складі ПФМ (3.8).

Кінетику тужавлення паст визначали за допомогою приладу АПСС-6 з автоматичною реєстрацією глибини занурення голки. Результати дослідів наведені в табл. 3.8 та на рис. 3.7.

Таблиця 3.8

Строки тужавлення цементно-зоільних паст

№ з/п	З/Ц	Вміст компонентів ПФМ, % маси цементу				Строки тужавлення, год.-хв.	
		ПФМ ₁		ПФМ ₂		початок	кінець
		СП-3	ПД	СП-3	ЭЦ		
1	-	-	-	-	-	1-30	3-30
2	0,4	-	-	-	-	1-55	3-55
3	-	0,3	-	-	-	1-40	3-35
4	0,4	0,7	-	-	-	2-05	4-05
5	0,4	0,7	0,03	-	-	2-15	4-10
6	0,4	-	-	0,5	0,1	2-30	4-40
7	0,4	-	-	0,5	0,3	2-50	4-50
8	0,4	-	-	0,7	0,3	2-55	5-05

В цементних пастах введення добавок ПФМ₁ і ПФМ₂ викликає уповільнення початку тужавлення, більш істотне для паст із ефірами целюлози. Добавка суперпластифікатора в діапазоні до 1% від маси цементу практично не змінює час закінчення тужавлення, на відміну від добавки Tylose, яка відсуває початок та кінець тужавлення на 30-60 хв.

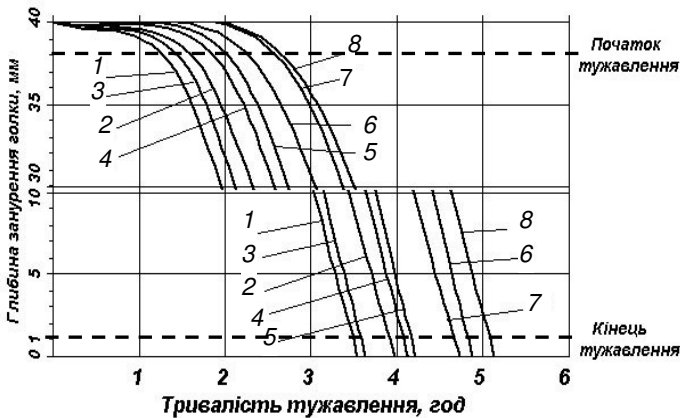


Рис. 3.7. Кінетика тужавлення цементних та цементно-зоільних паст, модифікованих добавками ПФМ₁ та ПФМ₂ (нумерація кривих за табл. 3.8)

Повітрявтягувальна добавка також накладає деякий сповільнюючий ефект як на початок, так і на кінець тужавлення, однак він виражений менш відчутно, ніж при введенні у цементно-зольні пасту ефірів целюлози.

Процес структуроутворення цементних систем поділяють на 3 етапи:

1. індукційний період, який проходить безпосередньо за замішуванням цементу водою;
2. етап початкового або коагуляційного структуроутворення;
3. етап кристалізаційного структуроутворення.

Межі цих етапів визначаються [87] характерним часом τ_1 , τ_2 , τ_3 – точками якісної зміни структури цементної системи, що схематично зображено на рис. 3.8. Час τ_1 характеризує умовний кінець індукційного періоду і початок процесу тужавлення, який закінчується в час τ_2 . Тоді ж починає утворюватись первинна, переважно алюмінатна, структурна сітка. Кристалізаційне зростання новоутворень основних носіїв міцності – силікатних мінералів – починається пізніше і може бути охарактеризоване часом τ_3 .

Структурно-механічною характеристикою твердіння дисперсних систем є пластична міцність. Величину пластичної міцності (P_m) в початковий період твердіння цементних і цементно-зольних паст визначали за допомогою кінцевого пластоміру конструкції МДУ. Глибину занурення конуса фіксували індикатором із ціною поділки 0.01 мм. Розрахунки проводили за формулою:

$$P_m = 0,096 P / h^2, \quad (3.10)$$

де P – вага конуса з привантаженням, Н;

h – глибина занурення конуса, мм.

Отримані пластограми (рис. 3.8...3.10) мають характерні дві ділянки. Ряд дослідників вважає, що перша ділянка пластограми приблизно відповідає часу тужавлення паст, а точка перегину – кінцю тужавлення. У роботах О.Е. Колмикової і М.В. Михайлова [114] показано, що пластична міцність характеризує граничне напруження зсуву дисперсної системи у визначений момент твердіння. Зміна пластичної міцності

цементних паст є інтегральною характеристикою рівномірного протікання процесів коагуляційного і кристалізаційного структуроутворення. При цьому, якщо перша ділянка пластограм характеризує переважно формування тіксотропної коагуляційної структури, то друга - період зміцнення коагуляційної і початок формування кристалізаційної структури. Аналіз пластограм показує, що зола і добавки ПАР, особливо на основі ефірів целюлози, дещо подовжують період коагуляційного структуроутворення. Добавка суперпластифікатора в цементно-зольних пастах викликає більш інтенсивний ріст пластичної міцності на другій ділянці пластограм.

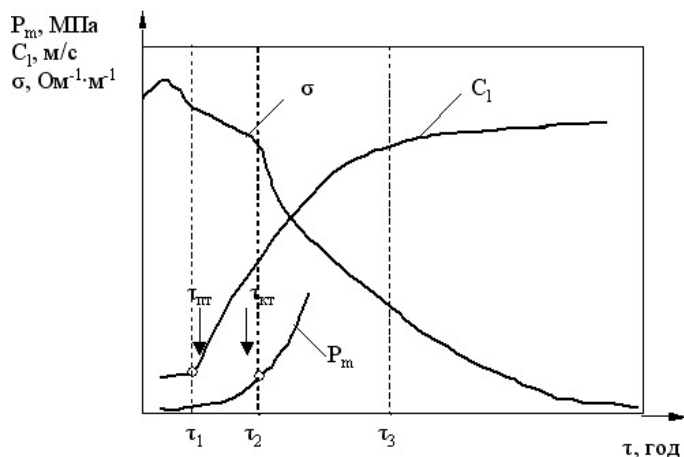


Рис. 3.8. Зміна пластичної міцності (P_m), питомої електропровідності (σ) та швидкості проходження ультразвукових хвиль (C_1) при твердінні цементних паст

Після завершення процесу формування коагуляційної структури, як випливає з пластограм, введення зольного наповнювача у поєднанні з добавками ПФМ викликає лавиноподібне збільшення пластичної міцності, що погоджується з теоретичними передумовами їх впливу на кристалізацію гідратних новоутворень.

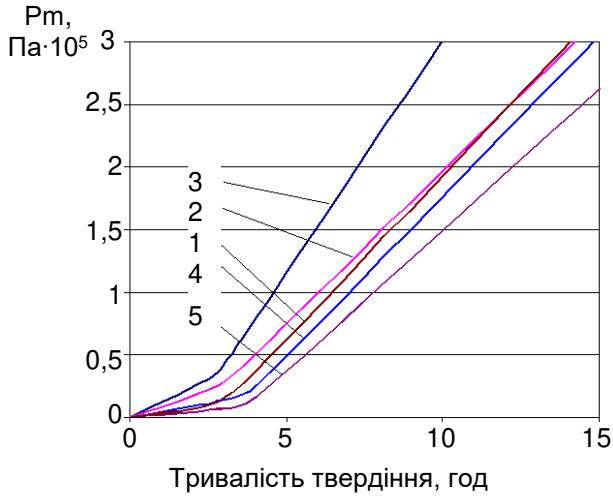


Рис. 3.9. Кінетика зміни пластичної міцності цементних та цементно-зольних паст з добавками, які входять до складу ПФМ₁ (склад паст в табл. 3.8)

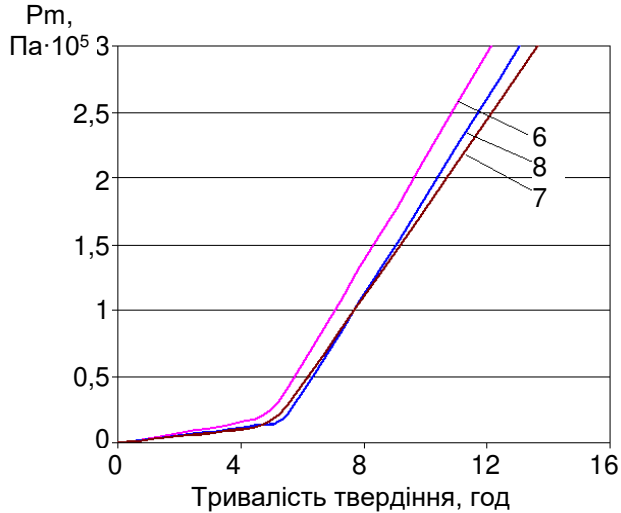


Рис. 3.10. Кінетика зміни пластичної міцності цементних та цементно-зольних паст з добавками, які входять до складу ПФМ₂ (склад паст за табл. 3.8)

Уже приблизно через 2...3 год після кінця тужавлення пластична міцність модифікованих паст збільшується майже в 4 рази і досягає 2,7 Па. Для немодифікованих паст така величина пластичної міцності досягається через значно більший проміжок часу. При низькій водопотребі цементних паст, замішаних водним розчином суперпластифікатора, і одночасно достатній концентрації активного наповнювача в системі вяжуче – замішувач створюються умови, які М.М. Сичов назвав “стиснутими” [33] і при яких стає можливим прояв сил різної природи, що приводять до утворення структури твердіння.

З кінетикою росту пластичної міцності погоджується і кінетика швидкості проходження через твердіючі цементно-водні пасти ультразвукових хвиль. Визначення швидкості проходження поздовжніх ультразвукових хвиль проводили паралельно із визначенням зміни електричного опору за допомогою приладу УК10 ПМС. Дослідження проводились методом наскрізного прозвучування з інтервалом 30 хв.

Результати дослідження особливостей структуроутворення цементно-зольних паст з добавками ПФМ за швидкістю проходження поздовжніх ультразвукових хвиль (C_i , м/с), наведені на рис. 3.11.

Початковий період формування коагуляційної структури на кривій швидкості ультразвуку характеризується горизонтальною ділянкою (рис. 3.11), довжина якого добре збігається з початком тужавлення. Визначення початку тужавлення по величині пластичної міцності ускладнене внаслідок її меншої чутливості до початкових контактів між частками. Швидкість формування структури можна пов'язати з кутом нахилу кривої швидкості ультразвуку, так як і пластичної міцності, до осі абсцис.

З кінетикою росту пластичної міцності та швидкості проходження ультразвуку корелюється і кінетика питомої електропровідності паст – величини, оберненої до питомого опору (рис. 3.12). Зміну питомого електричного опору зразків (σ , Ом⁻¹·м⁻¹) вимірювали на спеціальній установці, з використанням реохордного мосту Р38 при частоті змінного струму 50 Гц та комірки для зразків з плексигласу з інтервалом 30 хв.

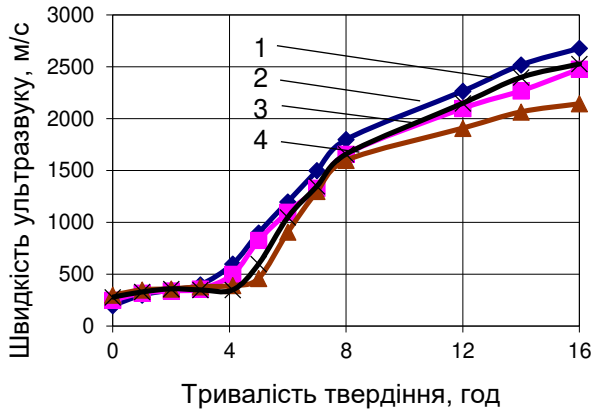


Рис. 3.11. Зміна швидкості проходження ультразвуку в цементних та цементно-зольних пастах з добавками, які входять до складу ПФМ1:1 – цементна паста без добавок; 2, 3, 4 – цементно-зольні пасти (2 – без добавок; 3 – СП-3=0,7%; 4 – СП-3=0,7%, ПД=0,03%)

Частинки цементу при взаємодії з водою утворюють іонне середовище, здатне проводити електричний струм. Електропровідність такого середовища зростає пропорційно до ступеня дисоціації електролітів (мінералів цементу) у воді [105]. В результаті вимірювання зміни електропровідності в часі отримано низку кривих характерної форми. Спочатку електропровідність починає зростати і через проміжок часу, що дорівнює в середньому 0,5...1 год, досягає свого максимуму, після цього змінюється незначно протягом певного часу, а далі відбувається її падіння (рис. 3.12).

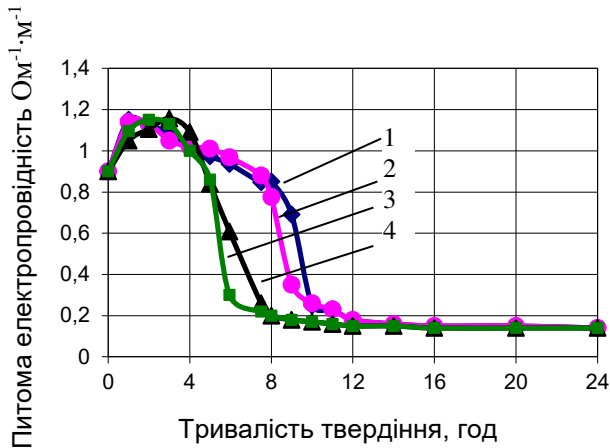


Рис. 3.12. Зміна питомої електропровідності цементних та цементно-зольних паст з добуваннями, які входять до складу ПФМ₁: 1 – цементна паста без добуваннями; 2, 3, 4 – цементно-зольні паста (2 – без добуваннями; 3 – СП-3=0,7%; 4 – СП-3=0,7%, ПД=0,03%)

Як відзначено в роботах [87, 105], протягом перших 40 хв інтенсивно відбуваються процеси гідролізу мінералів портландцементного клінкеру (в основному C_3A та C_4AF) і утворення насиченого розчину гідроксиду кальцію, зростання концентрації струмопровідних іонів в одиницю часу; при цьому електропровідність цементних паст зростає. Максимум електропровідності відображає початок індукційного періоду [84], під час якого відбувається інтенсивна адсорбція води мінералами, формування коагуляційної структури цементних паст і утворення зародків кристалів. Внаслідок меншого простору між цементними частинками процеси коагуляції у наповненій цементній пасті йдуть швидше, що призводить до скорочення індукційного періоду. При наявності адсорбційних плівок розчину СП на поверхні цементу і золи, процеси гідролізу дещо уповільнюються. Другий спад кривих відображає закінчення індукційного періоду і початок структуроутворення, який приладом Віка наближено характеризується як початок

тужавлення. Надалі електропровідність монотонно знижується, поки не досягне мінімуму у затверділій масі. Подальше зниження електропровідності до мінімального її значення викликане продовженням процесу гідролізу мінералів і в основному C_3S , кількість якого в клінкері максимальна. Хімічна активність золи у складі паст викликає більш інтенсивне зростання електричного опору внаслідок швидкого зв'язування струмопровідних іонів (рис. 3.12).

При введенні ПФМ, які вміщують високодисперсні кремнеземисті добавки, СП та РПП, можна чекати збільшення міцності коагуляційних контактів, що і підтверджується пластограмами (рис. 3.13). Характерно, що при приблизно рівній об'ємній концентрації мікрокремнеземистого і золомікрокремнеземистого наповнювачів абсолютні значення пластичної міцності цементних паст і кінетика її зміни досить близькі.

Мікрокремнезем і високодисперсна зола можуть як сповільнювати, так і прискорювати тужавлення і, особливо, його початок (табл. 3.9). Тужавлення цементного тіста викликається збільшенням обсягу продуктів гідратації з відповідним зменшенням відстані між частинками доти, доки не почнуть виникати сили когезії, пропорційні числу частинок, які стикаються одна з одною [23]. Зменшення відстані між гідратованими частинками і зміцнення коагуляційної структури при введенні високодисперсних добавок у складі ПФМ характерне при обмеженні водовмісту цементних паст за рахунок суперпластифікатора.

Основним якісним показником золи-виносу, який визначає можливість її хімічної взаємодії з цементом, є здатність зв'язувати гідроксид кальцію уже при нормальній температурі. Пуцоланова реакція золи за даними ряду дослідників [52] починається з адсорбції на її поверхні гідроксиду кальцію. При нормальних умовах адсорбційна плівка на частинках золи утворюється в розчині протягом 24 год. незалежно від типу заповнювача. Тонкі граничні шари, що виникають при цьому, служать провідниками іонів кальцію, під дією яких розвивається

поступова ерозія поверхні частинок золи. У ній утворюються заглиблення, де осідають продукти пуцоланової реакції.

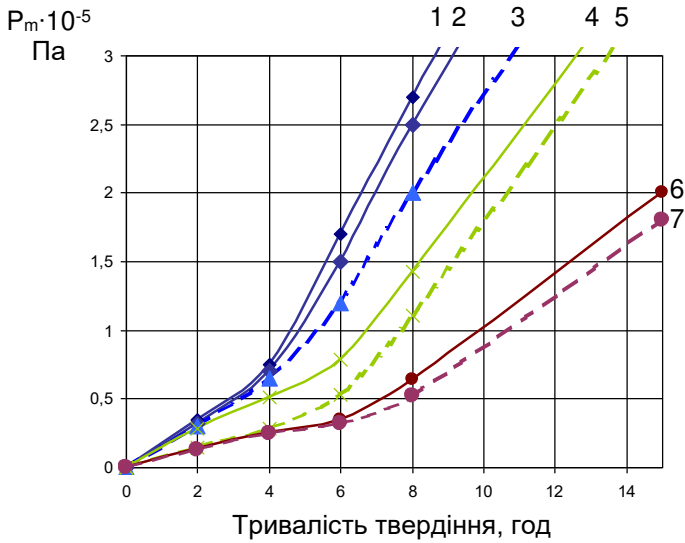


Рис. 3.13. Кінетика зміни пластичної міцності (P_m) цементно-водних паст (РПП = 1,5%; X_1, X_2 – згідно табл. 3.6):

- пасты, які містять МК;
- - - - пасты, які містять ЗД;
- 1, 3 – $X_1 = 1; X_2 = 0,2; СП = 0,35\%$;
- 2 – $X_1 = 0,5; X_2 = 0,5; СП = 0,7\%$;
- 4 – $X_1 = 1; X_2 = 0,5; СП = 0,35\%$;
- 5 – $X_1 = 0,2; X_2 = 0,2; СП = 0,35\%$;
- 6, 7 – $X_1 = 0,2; X_2 = 0,2; СП = 0$

Відповідно до цього механізму на зовнішній внутрішній поверхні золи існують активні центри. До цих центрів спочатку дифундують частки $Ca(OH)_2$. У подальшому починається осадження $Ca(OH)_2$ на активних центрах і виникає куляста плівка гідроксиду кальцію. Хімічна взаємодія між частинками $Ca(OH)_2$ і активною склоподібною фазою завершує пуцоланову реакцію золи.

Таблиця 3.9

Строки тужавлення наповнених цементно-водних паст
(вміст РПП = 1,5%)

Склад паст			Строки тужавлення, год.-хв.*	
$X_1 = \frac{V_{\text{КД}}}{V_{\text{КД}} + V_3}$	$X_2 = \frac{V_{\text{КД}} + V_3}{V_{\text{КД}} + V_3 + V_{\text{Ц}}}$	Вміст СП, % маси цементу	початок	кінець
0	0	0	2-10	6-05
1	0,2	0	2-40 / 2-50	6-10 / 6-40
1	0,5	0	2-55 / 3-05	6-20 / 6-50
0	0,2	0	2-30 / 2-30	6-20 / 6-10
0	0,5	0	3-15 / 3-30	7-30 / 6-20
1	0,2	0,35	1-40 / 1-55	5-40 / 6-10
1	0,2	0,7	1-25 / 1-40	4-20 / 4-40
1	0,5	0,35	2-15 / 2-25	6-20 / 5-50
1	0,5	0,7	2-05 / 2-20	5-50 / 5-50
0,2	0,2	0	2-30 / 2-40	6-40 / 6-10
0,2	0,2	0,35	1-55 / 2-10	5-30 / 5-50
0,2	0,2	0,7	1-55 / 2-05	5-10 / 5-20
0,2	0,5	0,35	2-25 / 2-35	5-30 / 5-40
0,5	0,2	0,35	2-05 / 2-20	5-20 / 5-00
0,5	0,2	0,7	1-45 / 1-50	5-20 / 5-20
0,5	0,5	0,35	2-15 / 2-40	5-40 / 5-40
0,5	0,5	0,7	2-05 / 2-30	5-20 / 5-30

Примітка. * – у чисельнику – для паст, які містять МК, у знаменнику – ЗД.

Вивчали методом титрування кінетику поглинання СаО золою-виносу з введенням добавок ПФМ₁ і ПФМ₂. Результати визначення пуцоланової активності золи-виносу після 30-денного витримання її з добавками в насиченому розчині вапна наведені в табл. 3.10, 3.11.

Таблиця 3.10

Пуцоланова активність золи-виносу з органічними добавками

№ з/п	Зола-виносу	Вміст компонентів ПФМ, % маси цементу			Поглинання СаО, мг/г, через, діб		
		СП	ПД	ЕЦ	3	7	28
1	Зола-виносу	–	–	–	9,5	18,8	35,5
2	Зола виносу з добавкою ПФМ ₁	0,3	-	–	7,3	17,1	37,1
3		-	0,03	–	6,1	17,5	34,8
4		0,3	0,03	–	6,5	18,1	36,2
5		0,7	0,03	–	6,3	17,8	37,2
6	Зола виносу з добавкою ПФМ ₂	–	–	0,1	6,9	17,5	35,1
7		0,3	–	0,1	6,4	18,3	36,2
8		0,3	–	0,3	6,1	17,5	35,4
9		0,7	–	0,3	5,9	17,8	35,9

Таблиця 3.11

Пуцоланова активність золи-виносу з тонкодисперсними мінеральними добавками

Мінеральний наповнювач	Вміст компонентів, %		Поглинання СаО, мг/г, через, діб		
	С-3	РПП	3	7	28
Зола-виносу	-	-	9,5	18,8	35,5
	-	1,5	9,2	18,3	36,5
	0,35	-	6,4	18,0	35,8
	0,7	-	6,1	17,5	34,8
	0,35	1,5	6,3	17,8	36,2
	0,7	1,5	6,5	17,8	35,8
Мікрокремнезем МК (20%) + зола-виносу (80%)	-	-	19,8	40,7	60,1
	-	1,5	19,0	39,2	61,1
	0,35	-	17,2	38,4	59,6
	0,7	-	15,4	36,4	58,6
	0,35	1,5	17,2	36,9	60,5
	0,7	1,5	17,0	36,8	60,1
Домелена зола ЗД (20%) + зола-виносу (80%)	-	-	14,2	26,9	53,4
	-	1,5	13,9	26,1	54,5
	0,35	-	13,5	25,9	52,0
	0,7	-	12,3	24,8	50,9
	0,35	1,5	14,0	26,9	54,1
	0,7	1,5	13,8	27,0	53,9

Як впливає з табл. 3.10, 3.11 як окремі компоненти ПФМ, так і їх комбінації суттєвого впливу на пуцоланову активність золи-виносу не чинять. Разом з тим, органічні добавки впливають на кінетику поглинання СаО золю-виносу в перші строки твердіння, помітно не зменшуючи поглинання золю СаО в 28 діб (рис. 3.14).

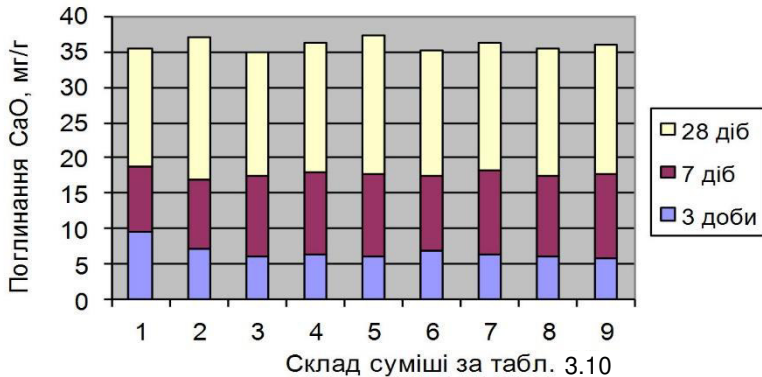


Рис. 3.14. Діаграма поглинання СаО золю-виносу з вапняно-зольних розчинів

При поглинанні вапна золю-виносу з органічними добавками і їх композиціями (рис. 3.14) простежуються два періоди: перший, який відповідає різкій початковій зміні концентрації $\text{Ca}(\text{OH})_2$, і другий, що характеризується меншою швидкістю процесу. Тривалість першого періоду для золи з органічними добавками, особливо ефірами целюлози, довша, ніж у золи без добавок.

Поділ процесу поглинання вапна колоїдним кремнеземом на два періоди раніше було відзначено в роботі П.Е. Холстеда і С.Д. Лоуренса [115]. Перший період ними інтерпретувався як адсорбція $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на частках SiO_2 . Кількість адсорбованого $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у грубому наближенні еквівалентна шару іонів Ca^{2+} на поверхні часток SiO_2 товщиною в один іон Ca^{2+} . Триваюче зниження концентрації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ відбувається внаслідок осадження з розчину гідросилікату кальцію, який утвориться в результаті хімічної реакції.

Особливості процесів гідrataції цементно-зольних паст із добавками ПФМ вивчали за допомогою хімічного методу, обчислюючи ступінь гідrataції цементу α за формулою:

$$\alpha = \frac{h}{W}; \quad (3.11)$$

де h – кількість гідратної, тобто такої, що не випаровується при 105°C , води, приєднаної до 1г цементу через визначений час;

W – кількість води, що не випаровується, приєднаної до 1г цементу при його практично повній гідrataції.

З цієї метою виготовляли зразки з цементно-зольного тіста з водов'язучим відношенням 0,5, котрі до заданого строку тверділи в нормальних умовах, потім їх подрібнювали, обробляли ацетоном для видалення вільної води і піддавали прожарюванню для визначення кількості вологи. Кількість води, що не випаровується, яка відповідає повній гідrataції цементу, визначалася багатоступінчастим замішуванням і прожарюванням подрібненого матеріалу до припинення приросту вмісту гідратної вологи.

Значення ступеня гідrataції паст із добавками ПФМ наведені в табл. 3.12 та на рис. 3.15...3.18.

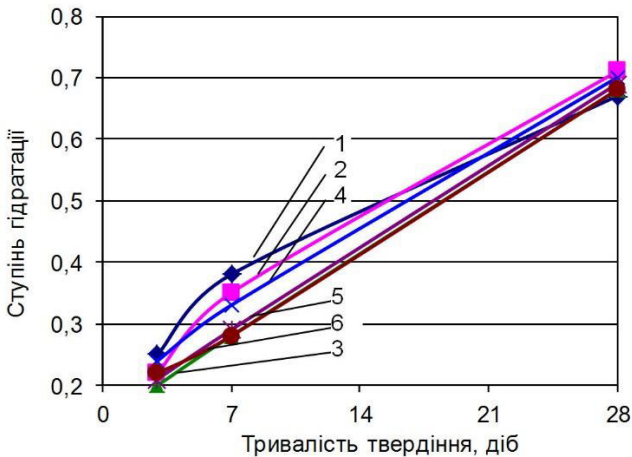


Рис. 3.15. Кінетика гідrataції цементно-зольного каменю з добавками, які входять до складу ПФМ₁ (склад паст за табл. 3.12)

Таблиця 3.12

Ступінь гідратації цементних та цементно-зольних паст з добавками ПФМ (золоцементне відношення З/Ц = 0,4)

№ з/п	ПФМ	Вміст компонентів ПФМ, % маси цементу				Ступінь гідратації в пастах через, діб		
		СП-3	ПД	ЕЦ	МК	3	7	28
1	ПФМ ₁	-	-	-	-	0,25/0,28	0,38/0,39	0,67/0,65
2		0,3	-	-	-	0,22/0,26	0,35/0,38	0,71/0,69
3		-	0,03	-	-	0,20/0,23	0,28/0,31	0,68/0,68
4		0,3	0,03	-	-	0,24/0,28	0,33/0,36	0,70/0,67
5		0,7	-	-	-	0,21/0,23	0,29/0,32	0,69/0,65
6		0,7	0,03	-	-	0,22/0,24	0,28/0,30	0,68/0,63
7	ПФМ ₂	-	-	0,1	-	0,19	0,27	0,66
8		0,3	-	0,1	-	0,17	0,26	0,68
9		0,3	-	0,3	-	0,23	0,32	0,67
10		0,7	-	0,3	-	0,22	0,31	0,69
11	ПФМ ₃	0,3	-	-	5	0,39	0,51	0,71
12		-	-	-	5	0,37	0,49	0,70
13		0,3	-	-	10	0,41	0,55	0,79
14		0,7	-	-	10	0,40	0,51	0,75

Примітка: У складах 1...6 під рискою наведений ступінь гідратації цементних паст без добавки золи.

Характер впливу ПФМ на ступінь гідратації цементних паст істотно не змінюється при введенні зольного наповнювача. У віці 28-діб відзначається (табл. 3.12) дещо більш високий ступінь гідратації цементу в цементно-зольних пастах із добавками ПФМ, ніж у цементних. Це можна пояснити прискоренням гідратації алітової фази в присутності зольного заповнювача, який хімічно зв'язує гідролітичний $\text{Ca}(\text{OH})_2$. За даними Ухікава [90] при однакових умовах ступінь гідратації C_3S через добу досягає 35%, а в суміші з золою складає вже 45%. При оцінці впливу зол на гідратацію цементу варто враховувати вміст в них лугів і сульфатів, які затримують гідратацію C_3A і C_4AF .

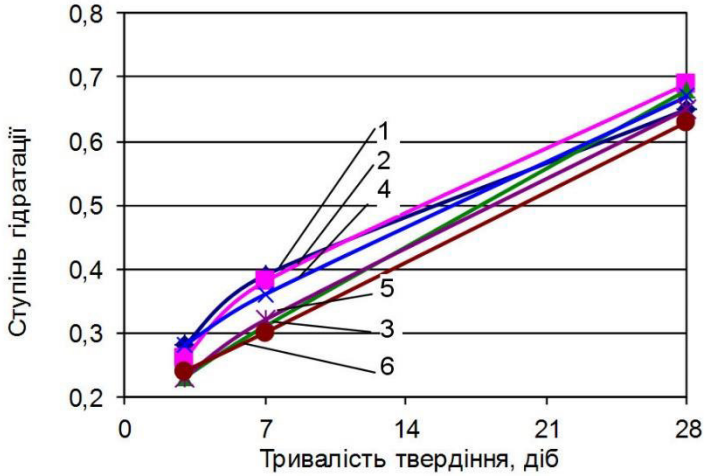


Рис. 3.16. Кінетика гідратації цементного каменю з добавками, які входять до складу ПФМ₁ (склад паст за табл. 3.12)

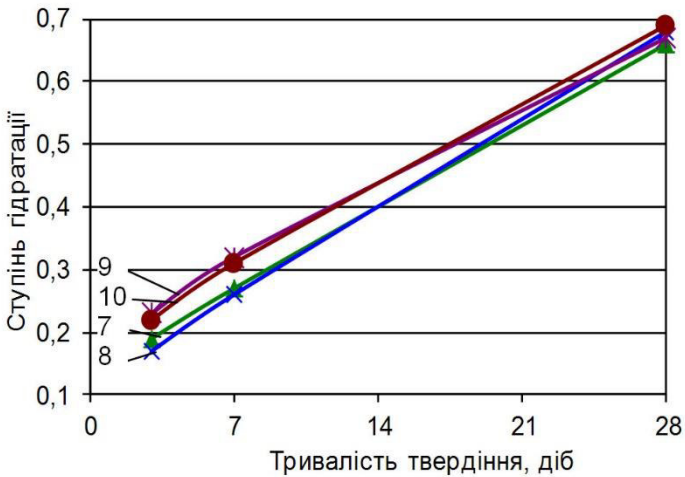


Рис. 3.17. Кінетика гідратації цементно-зольного каменю з добавками, які входять до складу ПФМ₂ (склад паст за табл. 3.12)

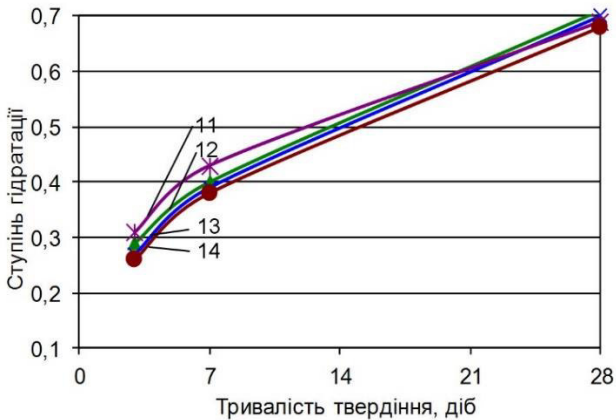


Рис. 3.18. Кінетика гідратації цементно-зольного каменю з добавками, які входять до складу ПФМ₃ (склад паст за табл. 3.12)

Зола-виносу, на відміну від інших активних мінеральних добавок, має порівняно невисоку гідралічну активність, що, з огляду на її дисперсність, не повинно істотно збільшувати адсорбційну активність стосовно ПФМ порівняно з цементом. Встановлено [99] також, що нафталіновий суперпластифікатор, який міститься в ПФМ, чинить дефлокуючу дію в зольному тісті, що сприяє інтенсивній гідратації в системі "зола–цемент–вода". З даних табл. 3.12 та рис. 3.16...3.18 випливає, що у ранньому віці окремі компоненти ПФМ, представлені органічними добавками, проявляють певний стабілізуючий ефект на гідратацію цементно-зольного в'язучого, що, очевидно, пояснюється екрануючою дією утворених адсорбційних шарів на зернах цементу та золи. За величиною стабілізаційного впливу на ранню гідратацію цементу компоненти ПФМ можна розмістити в ряд: ЕЦ > ПД > СП. У 28-добовому віці цементно-зольного каменю стабілізуючий вплив усіх досліджених ПФМ не відчувається. Встановлений вплив як окремих компонентів, так і композицій ПАР, використаних у якості ПФМ, на інтенсивність і повноту процесу гідратації цементу узгоджується із сучасними теоретичними уявленнями [5, 99]. Як відомо, механізм стабілізації процесів гідратації цементів із добавками ПАР має

адсорбційну природу. Ступінь гальмуючого ефекту ПАР на процеси гідратації цементів залежить від проникності адсорбційних прошарків. Полімерні ПАР типу ЕЦ утворюють, ймовірно, більш щільні адсорбційні оболонки на зернах цементу і продуктах його гідратації ніж суперпластифікатори нафталінформальдегідного типу (рис. 3.17).

Присутність у складі ПФМ тонкодисперсного кремнеземистого компонента суттєво збільшує ступінь гідратації цементно-зольних паст, особливо в ранні строки твердіння (табл. 3.12).

3.5. Технологічні властивості цементно-зольних розчинових сумішей

Водопотреба та водоутримуюча здатність розчинових сумішей з добавками ПФМ. Технологічна ефективність розчинових сумішей значною мірою визначається їхньою водопотребою та стійкістю до розшарування, яка характеризується водоутримуючою здатністю. Важливе значення має також "життєздатність" розчинових сумішей, тобто зберігання їхньої консистенції в часі, спроможність до повітровтягування в процесі перемішування і повітряутримання в процесі транспортування та ущільнення.

Для вивчення впливу вмісту і складу ПФМ на основні властивості модифікованих розчинових сумішей при співвідношенні цементно-зольне в'язуче: кварцовий пісок з $M_{кр}=1,65$ були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до трирівневого трьохфакторного плану B_3 [109]. Умови планування наведені в табл. 3.13. Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати рівняння регресії у кодованих змінних, наведені у табл. 3.14.

Цементно-зольні розчинові суміші готували при постійній пластичності. Водопотребу сумішей знаходили необхідну для досягнення розпливу конуса 170...180 мм. Повітрявміст паст визначали об'ємним способом. Об'ємний коефіцієнт водовідділення (K_v , %) розчинових сумішей та водоутримуючу здатність ($B_{утр}$) розраховували за формулами:

$$K_v = \frac{a - \epsilon}{a} \cdot 100\%, \quad (3.12)$$

$$V_{\text{утр}}^c = 100 - K_v. \quad (3.13)$$

де a – початковий об’єм цементної суспензії, см^3 ;
 ϵ – об’єм цементної суспензії, яка осіла, см^3 .

Експерименти проводили з двократним повторенням.

Таблиця 3.13

Умови планування експериментів при дослідженні нормальної густоти і ефективної в’язкості цементно-зольних розчинових сумішей з добавками ПФМ

Технологічні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодовий вид	-1	0	+1	
Пасти з добавкою ПФМ ₁ (СП-3 + ПД)					
Вміст повітровтягувальної добавки, % маси цементу	X ₁₍₁₎	0	0,02	0,04	0,02
Вміст суперпластифікатора СП-3, % маси цементу	X ₂	0	0,35	0,7	0,35
Золо-цементне відношення	X ₃	0	0,35	0,7	0,35
Пасти з добавкою ПФМ ₂ (СП-3 + ЕЦ)					
Золо-цементне відношення	X ₃	0	0,35	0,7	0,35
Вміст водоутримуючої добавки (ЕЦ), % маси цементу	X ₁₍₂₎	0,1	0,25	0,4	0,15
Вміст суперпластифікатора СП-3, % маси цементу	X ₂	0	0,35	0,7	0,35
Золо-цементне відношення	X ₃	0	0,35	0,7	0,35

Таблиця 3.14

Експериментально-статистичні моделі властивостей
модифікованих цементно-зольних розчинових сумішей

Властивість	Рівняння регресії
Поліфункціональний модифікатор ПФМ ₁	
Водопотреба, л/м ³	$B = 265,7 - 3,10X_{1(1)} - 27,3X_2 - 1,20X_3 + 0,74X_{1(1)}^2 - 5,26X_2^2 + 2,24X_3^2 + 0,88X_{1(1)}X_2 + 2,13X_{1(1)}X_3 + 1,88X_2X_3 \quad (3.14)$
Водоутримуюча здатність, %	$B_{\text{утр}} = 3,39 - 0,47X_{1(1)} + 0,11X_2 - 0,43X_3 + 0,254X_{1(1)}^2 - 0,246X_2^2 + 0,45X_3^2 + 0,113X_2X_3 \quad (3.15)$
Поліфункціональний модифікатор ПФМ ₂	
Водопотреба, л/м ³	$B = 271,7 + 3,8X_{1(II)} - 25,6X_2 + 1,80X_3 + 4,01X_{1(II)}^2 - 2,99X_2^2 - 1,99X_3^2 - 0,50X_{1(II)}X_2 + 3,50X_{1(II)}X_3 + 2,50X_2X_3 \quad (3.16)$
Водоутримуюча здатність, %	$B_{\text{утр}} = 0,70 - 1,79X_{1(II)} + 0,04X_2 - 0,26X_3 + 1,703X_{1(II)}^2 - 0,147X_2^2 + 0,053X_3^2 + 0,163X_{1(II)}X_3 + 0,138X_2X_3 \quad (3.17)$

Як і слід було очікувати з аналізу отриманих моделей найбільш суттєве зниження водопотреби має місце при переважанні у складі ПФМ суперпластифікатора СП-3 (рис. 3.19, 3.20). При цьому найбільш суттєво вплив СП-3 позначається при його дозуванні 0,7% від маси цементу (зниження водопотреби до 20...22%).

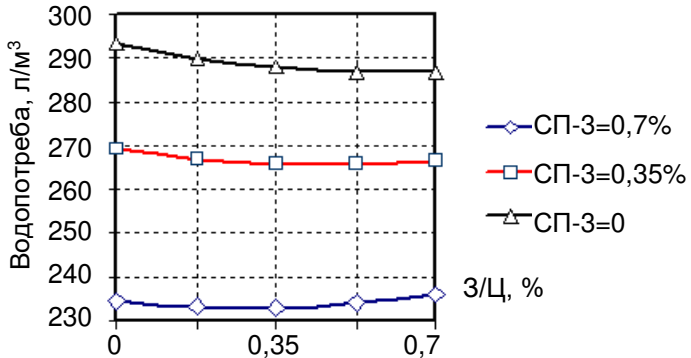
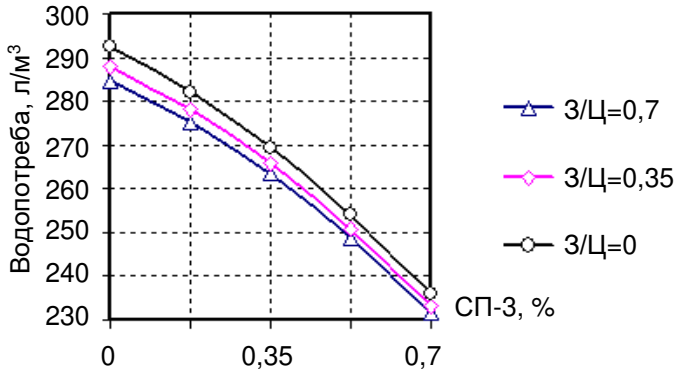
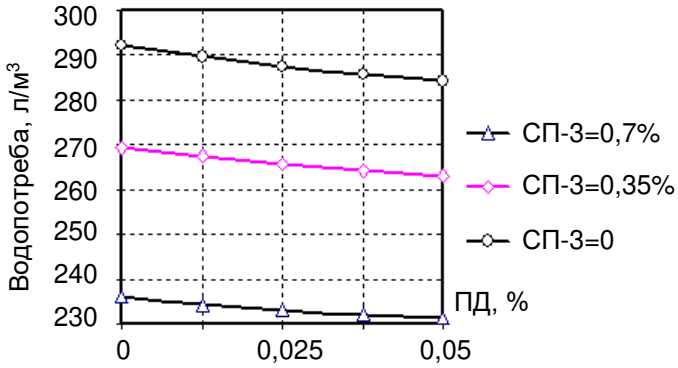


Рис. 3.19. Залежність водопотреби цементно-зольних розчинових сумішей від вмісту компонентів модифікатора ПДФМ₁ та золю-цементного відношення

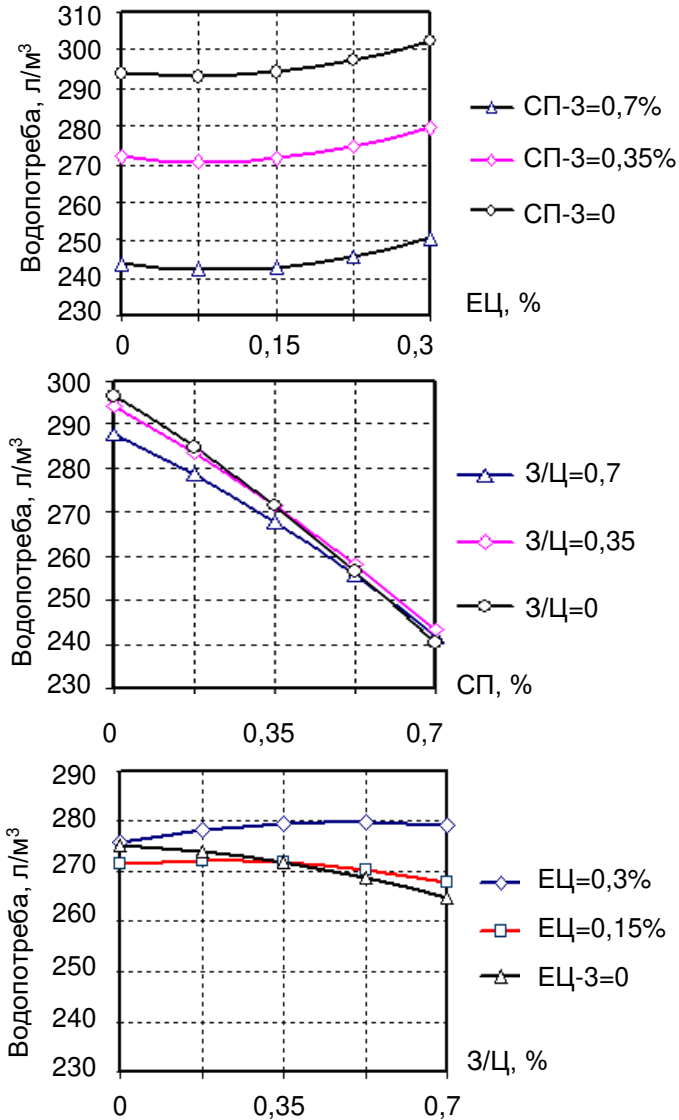


Рис. 3.20. Залежність водопотреби цементно-зольних розчинових сумішей від вмісту компонентів модифікатора ПФМ₂ та золю-цементного відношення

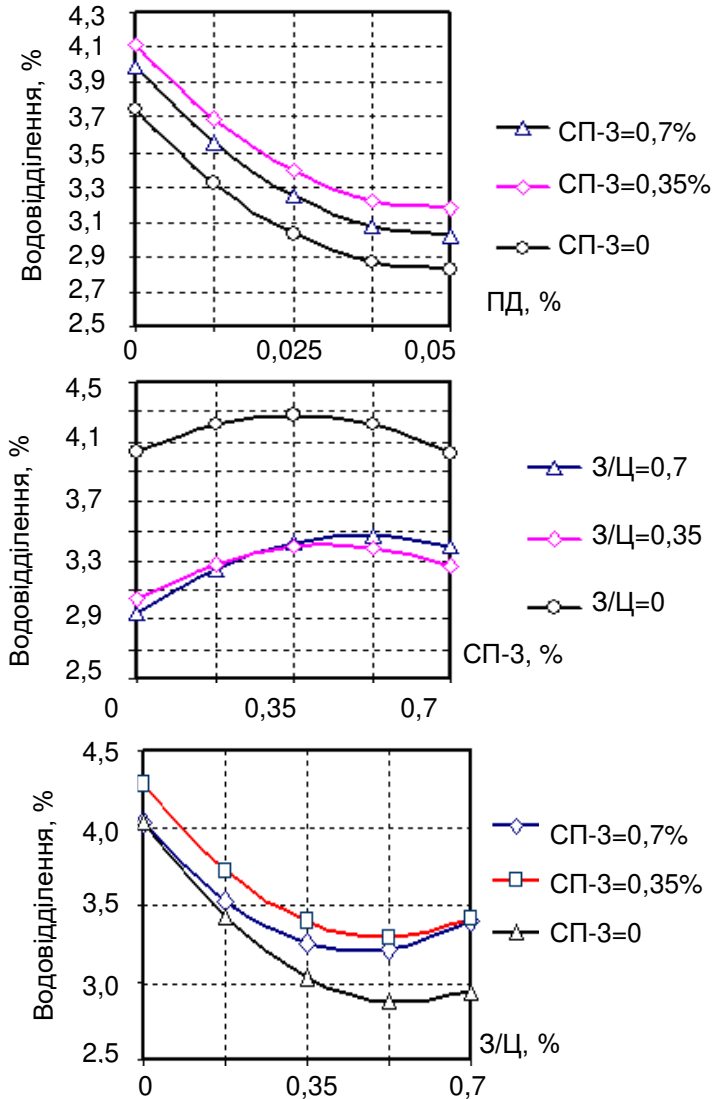


Рис. 3.21. Залежність водовідділення цементно-зольних розчинових сумішей від вмісту компонентів модифікатора ПФМ₁ та золю-цементного відношення

Синергетичний пластифікуючий ефект суперпластифікатора СП-3 та повітровтягувальної ПАР проявляється ефектом взаємодії X_1 та X_2 в моделі водопотреби, що можна пояснити різним механізмом їх розріджуючої дії. У механізмі дії суперпластифікатора СП-3, як відомо [5], переважає ефект електростатичного відштовхування частинок цементу, обумовлений тим, що адсорбційні шари з молекул СП збільшують величину дзета-потенціалу на поверхні зерен цементу. Пластифікуюча дія повітровтягувальних ПАР зумовлена, в основному, ефектом змащення повітряної емульсії, яка суттєво збільшує здатність системи деформуватись при прикладанні до неї зовнішніх зусиль. Об'єднання у ПФМ вказаних механізмів пластифікуючої дії його складових дозволяє забезпечити відповідний розріджуючий ефект.

Добавка ЕЦ будучи загущувачем цементних і цементно-зольних паст приводить до певного збільшення водопотреби розчинових сумішей. При введенні ПФМ, який містить поряд з ЕЦ суперпластифікатора СП-3 водопотреба сумішей зменшується, однак “загущуючий” ефект ЕЦ відчувається у всьому дослідженому діапазоні зміни вмісту СП-3.

Значне зниження рухомості розчинової суміші спостерігається при використанні ефіру целюлози та суперпластифікатора нафталін-формальдегідного типу СП-3. При спільному введенні цих добавок відбувається поєднання частинок цементу своєрідними містками (рис. 3.22), які адсорбуються на зернах цементу [3, 116]. Вплив золо-цементного відношення на водопотребу розчинових сумішей, як і на їхню в'язкість, має екстремальний характер, який зберігається як при введенні одинарних добавок, так і їх подвійних комбінацій. При оптимальному золо-цементному відношенні для досягнення мінімально можливої водопотреби сумішей необхідний менший вміст суперпластифікатора. На водопотребу розчинових сумішей поряд з водопотребою цементно-зольного в'язучого повинні помітно позначатися вміст і водопотреба піску. Це відоме положення технології розчинів підтверджується і для модифікованих цементно-зольних сумішей.

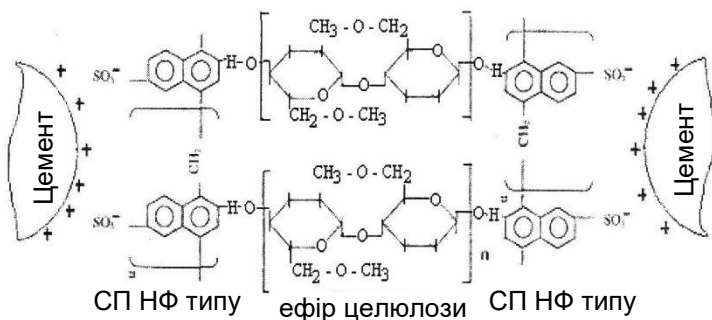


Рис. 3.22. Взаємодія частинок цементу, суперпластифікатора нафталінформальдегідного типу (СП НФ) та ефіру целюлози

На рис. 3.23 наведені отримані експериментальні дані щодо водопотреби розчинових сумішей різних складів без та з добавками ПФМ із використанням вихідних матеріалів, характеристика яких приведена раніше. Витрату води доводили до розпливу конуса розчинової суміші 170...180 мм. При такому розпливі конуса на струшуючому столику, як показали попередні досліди, рухомість суміші по зануренню конуса СтройЦНИИЛа складає 8...10 см. З рис. 3.23 очевидно, що по мірі зростання масового співвідношення піску і цементу (n), нормальної густоти цементу і водопотреби піску росте водопотреба сумішей, що узгоджується з відомими уявленнями [117].

З отриманих даних можна також зробити висновок, що пластифікуюча дія суперпластифікатора СП-3 більш сильно позначається у “жирних” сумішах з більшою кількістю цементно-зольного в’язучого, а повітрявтягувальної добавки – навпаки – у більш “пісних сумішах”. Якщо дія суперпластифікатора позначається переважно через адсорбційний ефект на зернах цементу та золи, то повітровтягувальна добавка забезпечує більший вміст пухирців втягнутого повітря і відповідне зниження в’язкості суміші при більшому вмісту піску.

Водовідділення розчинових сумішей – результат седиментаційного ущільнення та осадження твердих частинок. Вона обумовлена водоутримуючою здатністю в’язучого та

окремих його компонентів, а також залежить від водоутримуючої здатності заповнювачів та їх вмісту у суміші [94].

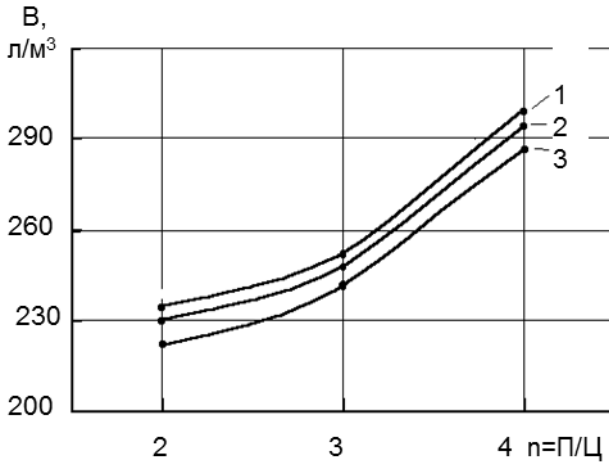


Рис. 3.23. Вплив піщано-цементного відношення (n) розчинової суміші на її водоутримуючу здатність ($3/Ц = 0,4$):

- 1 – ПФМ₂ (СП-3 – 0,3% ЕЦ – 10%);
- 2 – ПФМ₁ (СП-3 – 0,3% ПД – 0,03%);
- 3 – ПФМ₁ (СП-3 – 0,7% ПД – 0,03%)

Відповідно до теоретичних уявлень, розвинутих І.М. Ахвердовим та І.М. Грушко [118], водовідділення розчинових сумішей визначається нормальною густиною цементу, водоутримуючістю та вмістом дисперсних наповнювачів. Відповідно до цих уявлень, здатність цементного гелю утримувати певний об'єм води визначається інтенсивністю сил взаємодії між частинками: чим щільніше вони упаковані, тонші оболонки, тим менші структурні комірки між сольватованими частинками цементу і міцніше утримується в них вода. Водоутримуюча здатність цементного гелю зростає із збільшенням водоутримуючості цементу, яка може бути опосередковано визначена за значенням нормальної густоти.

Максимальне значення $В/Ц$, яке характеризує водоутримуючу здатність цементного тіста у його статичному стані дорівнює $1,65 K_{н.г}$ [105]. За І.М. Грушко критичне $В/Ц$ з

урахуванням можливого впливу на суміш при транспортуванні дорівнює 1,35 $K_{н.г}$. Мінімальне водовідділення суміші спостерігається при введенні добавки ЕЦ. Як випливає з моделі водовідділення, із збільшенням вмісту СП-3 і, відповідно, зменшенням $K_{н.г}$ у сумішах зі всіма видами ПФМ тенденція до водовідділення зростає. Разом з тим, введення до складу ПФМ повітровтягуювального компонента і особливо ефірів целюлози дозволяє цю тенденцію знівелювати і забезпечити достатню седиментаційну стійкість сумішей.

Вивчення цементно-зольних суспензій показало [96], що гідроксид кальцію, що виділяється при гідролізі цементу адсорбується на поверхні часток золи, у результаті чого утворюються плівки $\text{Ca}(\text{OH})_2$, розділені тонкими граничними шарами води. Гідроксильні іони, утворені в основному при дисоціації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ проникають в склоподібну фазу золи, викликаючи поляризацію зв'язків Si-O-S і Al-O-Si. Катіони Ca^{2+} , що відокремилися при дисоціації від твердої фази утворюють зовнішню оболонку подвійного шару, звернену до рідкої фази.

Відповідно до теорії подвійного електричного шару [5] частина протиіонів до яких можна віднести іони Ca^{2+} знаходиться в безпосередньому зіткненні з іонами твердої фази, утворюючи щільний шар, інша частина складає дифузійний шар. Електрокінетичні явища, обумовлені іонами дифузійного шару, характеризуються об'ємним зарядом рідкої фази або ζ -потенціалом. Зі збільшенням надлишку іонів у дифузійній частині ζ -потенціал збільшується, перехід іонів дифузійного шару в щільний супроводжується його зменшенням.

Відповідно до сучасних уявлень седиментаційна стійкість дисперсних систем підвищується зі збільшенням ζ -потенціалу [5]. Електрокінетичні властивості паст визначали методом електроосмосу. Суть методу полягає у вимірюванні об'ємної швидкості електроосмосу, тобто руху суспензії через капілярну систему (діафрагму) під дією прикладеної електрорушійної сили. Із збільшенням надлишку іонів у дифузійній частині, тобто із збільшенням електрокінетичного потенціалу зростає кількість

перенесеної рідини за одиницю часу й об'ємна швидкість електроосмосу. Результати визначення електрокінетичного потенціалу паст наведені на рис. 3.24. У цілому вони добре погоджуються з даними по водовідділенню досліджених суспензій. Насичення паст приводить до збільшення їх ζ -потенціалу і підвищення седиментаційної стійкості.

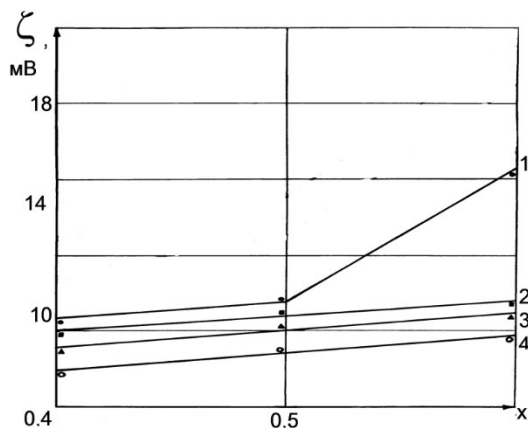


Рис. 3.24. Вплив параметрів складу паст на електрокінетичний потенціал:

- 1 – ПФМ₂ (З/Ц = 0,4; СП-3 – 0; ЕЦ – 0,3%);
- 2 – ПФМ₂ (З/Ц=0,4; СП-3 – 0,3%; ЕЦ – 0,3%);
- 3 – ПФМ₁ (З/Ц=0,4; СП-3 – 0,3%; ПД – 0,03%);
- 4 – ПФМ₁ (З/Ц=0,4; СП-3 – 0,7%; ПД – 0,03%)

Вплив суперпластифікатора на ζ -потенціал можна пояснити з позиції його адсорбційного механізму дії в цементних системах. Відповідно до відомих теоретичних уявлень [5] при введенні в цементно-водні дисперсії ПАР їх молекули адсорбуються на найбільш активних ділянках поверхні твердої фази, причому на гідрофільній поверхні адсорбенту молекули орієнтуються полярним кінцем до розчину, відповідно до правила полярності П.О. Ребіндера. Це приводить до екранування подвійного електричного шару іонів на поверхні

твердої фази і зменшення величини електрокінетичного потенціалу.

Збільшенню водоутримуючої здатності цементно-зольних паст сприяє введення заповнювача.

У роботі [119] показано, що для цементних сумішей, що містять заповнювачі, більш доцільно для прогнозування водоутримуючої здатності ($V_{\text{утр}}$) використовувати залежність:

$$V_{\text{утр}} = (1,35 \dots 1,65)K_{\text{н.г}} \text{Ц} + V_{\text{п}}\text{П} + V_{\text{щ}}\text{Щ}, \quad (3.18)$$

де $V_{\text{п}}$, $V_{\text{щ}}$, П, Щ – відповідно значення водопотреби та питомої витрати піску та щебеню.

На основі модифікованих цементно-зольних паст виготовляли розчинові суміші складу 1:2, 1:3 та 1:4 при $3/\text{Ц}=0,4$ і розпливі конуса 170...180 мм. Водопотреба піску, визначена за методикою Ю.М. Баженова, коливалася від 6 до 9%. Водовідділення розчинових сумішей визначали після їх відстоювання у циліндрі.

Оцінка отриманих даних показує, що як і слід очікувати, із введенням піску і збільшенням його вмісту в суміші та водопотреби водоутримуюча здатність розчинів збільшується. Використання для розрахунку водоутримуючої здатності модифікованих цементно-зольних сумішей рівняння 3.18, 3.19 неприйнятно, головним чином через те, що не враховується ефект впливу ПФМ, що впливає не тільки через зміну $K_{\text{н.г}}$. На водоутримуючу здатність розчинових сумішей очевидно позначається об'єм втягнутого повітря і особливо здатність ефірів целюлози утворювати аквакомплекси, що міцно утримують воду. Як показує аналіз, розрахункова залежність для орієнтовної оцінки кількості води, що утримується модифікованими цементно-зольними сумішами, може бути представлена у вигляді рівняння:

$$V_{\text{ут}} = (1,35 \dots 1,65)K_{\text{н.г}} (\text{Ц}+3) + V_{\text{п}}\text{П} + K\text{Р}_{\text{мод}}, \quad (3.19)$$

де $\text{Р}_{\text{мод}}$ – параметр, що оцінюється для ПФМ видом і змістом компонентів, що входять до них;

П – вміст піщаного заповнювача, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$V_{\text{п}}$ – водопотреба піску.

Легкоукладальність модифікованих розчинових сумішей. Для дослідження впливу всієї сукупності факторів складу розчинових сумішей, наповнених золою, з добавками ПФМ, на їх легкоукладальність виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до типового трирівневого плану Na_5 . Умови планування експериментів наведено у табл. 3.15, а отримані статистичною обробкою моделі – у табл. 3.16.

Таблиця 3.15

Умови планування експериментів при дослідженні легкоукладальності розчинових сумішей з добавками ПФМ

Технологічні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Вміст повітрявтягувальної добавки, ПД, % від маси цементу	$X_{1(I)}$	0	0,025	0,05	0,025
Вміст водоутримуючої добавки (ЕЦ), % маси цементу	$X_{1(II)}$	0	0,15	0,3	0,15
Вміст суперпластифікатора СП-3, % від маси цементу	X_2	0	0,35	0,7	0,35
З/Ц	X_3	0	0,35	0,7	0,35
Витрата води В, кг/м ³	X_4	240	270	300	30
В/Ц	X_5	0,6	0,8	1,0	0,2

Аналіз отриманих моделей показує, що найбільше на зміну рухомості модифікованих розчинів впливають вміст суперпластифікатора (фактор X_2) та витрата води (фактор X_4). Звертає на себе увагу досить значний ефект взаємодії факторів $X_{1(I)}$ та X_2 , який показує, що одночасна зміна цих факторів (вмісту окремих компонентів модифікатора ПФМ₁) підсилює їх інтегральну дію. У всіх сумішах забезпечували постійне співвідношення цементу та піску за масою (1:3).

Таблиця 3.16

Експериментально-статистичні моделі легкоукладальності
(занурення конуса) модифікованих цементно-зольних
розчинових сумішей

Модифікатор	Рівняння регресії
ПФМ ₁ (суперпластифікатор СП-3 + повітрявтягувальна добавка)	$Z_{к(1)} = 9,73 + 1,08X_{1(I)} + 2,2X_2 + 0,62X_3 + 1,25X_4 - 1,14X_{1(I)}^2 + 0,37X_2^2 + 0,62X_3^2 + 0,37X_4^2 + 0,37X_5^2 + 0,28X_{1(I)}X_2 + 0,28X_2X_4 + 0,41X_3X_5 - 0,59X_4X_5 \quad (3.20)$
ПФМ ₂ (суперпластифікатор СП-3+ водоутримуюча добавка Tylose)	$Z_{к(2)} = 8,44 - 0,56X_{1(II)} + 2,47X_2 + 0,97X_4 + 0,07X_{1(II)}^2 + 0,82X_2^2 - 0,18X_3^2 - 0,18X_4^2 + 0,07X_5^2 - 0,25X_{1(II)}X_2 + 0,38X_2X_5 - 0,50X_3X_4 - 0,69X_4X_5 \quad (3.21)$

В отриманих поліноміальних моделях занурення конуса у розчинову суміш виявився незначимим вплив фактора X_5 – водоцементного відношення в діапазоні 0,6...1,0. З технології бетону відомо, що до певного критичного Ц/В зберігається правило постійності водопотреби, тобто із зміною Ц/В водопотреба залишається практично постійною (рис. 3.25). Як показує аналіз отриманих моделей, для розчинових сумішей також зберігається правило постійності водопотреби при різних дозуваннях компонентів ПФМ та золоцементних відношеннях. При цьому поряд з об'ємом наповненого тіста на рухомості помітно позначається золоцементне відношення.

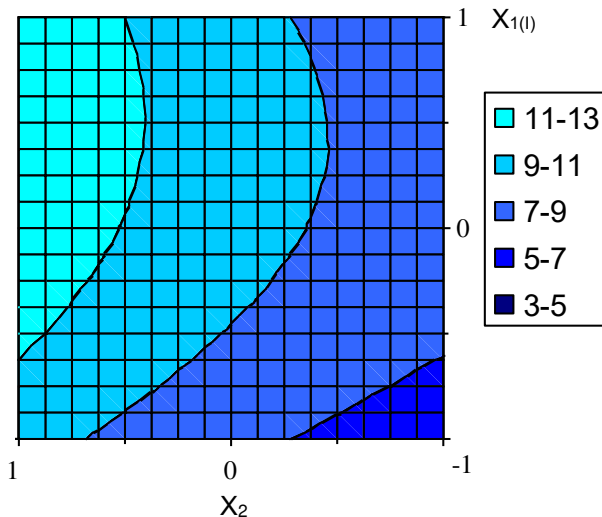


Рис. 3.25. Ізолінії занурення стандартного конуса (см) в розчинів суміші, модифіковані ПФМ₁ ($Z/\text{Ц} = 0,35$ $V = 270$ $\text{кг}/\text{м}^3$; $V/\text{Ц} = 0,8$)

Окремі досліди були проведені для вивчення зміни рухомості в часі золоцементних сумішей з добавками ПФМ. Досліди проводили при температурі $20 \pm 2^\circ \text{C}$. Суміші мали $V/\text{Ц} = 0,6$, змінювали вид та витрату окремих компонентів ПФМ. Початкова рухомість за зануренням конуса СтройЦНИИЛ складала 11...13 см. Результати дослідів наведені у табл. 3.17.

Вони показують, що літа консистенція суміші (глибина занурення конуса більша 10 см) у сумішах з добавкою СП-3 (0,3%) без золи зберігається 20 хв., з добавкою СП-3 (0,3%) + ПД (0,03%) – 60 хв., з добавкою СП-3 (0,3%) + ЕЦ (0,3%) – 100 хв. Введення золи-виносу при $Z/\text{Ц} < 0,4$ позитивно позначається на збереженні рухомості, при подальшому збільшенні золоцементного відношення темп її падіння дещо збільшується. Позитивний вплив золи на стабілізацію легкоукладальності розчинових сумішей у присутності СП-3 можна пов'язати з їх підвищеною водоутримуючою здатністю. Про досить високу життєздатність розчинових сумішей з оптимальною добавкою золи та придатність їх до транспортування на великі відстані

вказують і інші автори. Прискорення темпу падіння рухомості сумішей з підвищеним золоцементним відношенням пояснюється прискоренням строків тузавлення цементу [6].

Таблиця 3.17

Зміна рухомості в часі розчинових сумішей
з добавками ПФМ

№ складу	З/Ц	Занурення конуса, см, через, хв.				
		20	40	60	80	100
Добавка СП-3 (0,3%)						
1	0	10,8	7,3	5,2	2,4	-
2	0,35	11,4	8,5	6,1	3,7	-
3	0,7	9,5	6,5	3,7	1,5	-
Добавка ПФМ ₁ : СП-3 (0,3%) + ПД 0,03%						
4	0	12,2	10,5	9,9	6,8	3,2
5	0,35	11,6	10,6	10,2	7,5	4,5
6	0,7	11,2	10,0	8,6	5,8	3,4
Добавка ПФМ ₂ : СП-3 (0,3%) + ЕЦ 0,3%						
7	0	11,6	10,7	10,4	10,1	6,9
8	0,35	11,5	10,6	10,5	10,3	8,1
9	0,7	10,5	10,4	10,0	8,7	6,4

Стабілізуючий вплив на втрату рухомості чинять повітрявтягувальна і, особливо, водоутримуюча добавка. Вони дозволяють суттєво подовжити "живучість" розчинових сумішей, які містять суперпластифікатор.

Кінетика втрати рухомості модифікованими розчинами узгоджується із зміною строків тузавлення та пластичною міцністю цементно-зольного тіста (рис. 3.26). Криві падіння рухомості розчинових сумішей з добавками ПФМ можна розбити на етапи відносної стабільності та прогресуючого зниження рухомості. Як весь період зниження рухомості, так і період відносної стабільності (рис. 3.26) тісно корелюються з періодом формування структури на кривих пластичної міцності за інших рівних умов. На темп падіння рухомості розчинових сумішей у більшій мірі впливає золоцементне відношення.

Рухливість, см

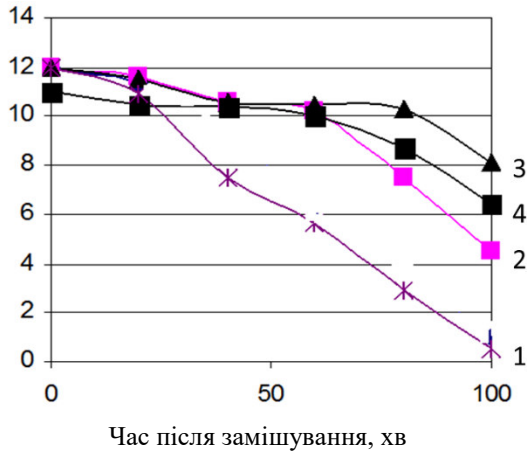


Рис. 3.26. Зміна рухомості розчинових сумішей у часі (З/Ц = 0,35):
 1 – СП-3 = 0,3%; 2 – СП-3 (0,3%) + ПД 0,03%;
 3 – СП-3 (0,3%) + ЕЦ 0,3%; 4 – СП-3 (0,3%) + ЕЦ 0,3% (З/Ц=0,7)

Кінетика зміни реологічних властивостей розчинових сумішей у часі суттєво залежить від температурного фактора. Підвищення температури до 30° С не приводить до суттєвого падіння початкової рухомості розчинових сумішей і не надто збільшує крутизну спаду. При температурах вищих 30° С період відносної стабільності легкоукладальності сумішей з добавкою ПФМ практично зникає, хоча їх початкова рухомість вища ніж без добавок. При 40° С уже видно помітне зниження початкової рухомості розчинових сумішей – до 6-7 см для сумішей без добавок і до 7-8 см для сумішей з ПФМ. При 60° С початкова рухомість зменшується до 3-4 см, що робить використання розчинів практично неможливим.

Аналіз експериментальних даних показує, що легкоукладальність розчинових сумішей у часі у загальному вигляді змінюється відповідно до рівняння:

$$S_{\tau} = S_0(1 - k\tau), \quad (3.22)$$

де S_0 – занурення конуса розчинової суміші, безпосередньо після її перемішування ($\tau = 0$);

S_τ – рухомість розчинової суміші через час τ , год, після замішування;

k – коефіцієнт відносної зміни рухомості суміші, який залежить від температури навколишнього повітря та виду ПФМ.

На зміні легкоукладальності в часі повинні позначатись, очевидно, всі фактори, які визначають швидкість гідратації цементу. Окрім В/Ц та температури, до таких факторів відносять активність та дисперсність цементу, від добавок, їх співвідношення.

Вплив кремнеземистого компонента у складі ПФМ на технологічні властивості розчинових сумішей. Вивчали вплив дисперсних кремнеземистих компонентів у складі ПФМ на основні технологічні властивості розчинових сумішей: водопотребу, водовідділення, водоутримуючу здатність та рухомість.

Для вивчення сумісного впливу кремнеземистого та органічних компонентів ПФМ – СП та РПП на технологічні властивості розчинових сумішей виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до тривірневого плану Na_5 [109]. Умови планування і отримані поліноміальні моделі наведені в табл. 3.18, 3.19.

Таблиця 3.18

Умови планування експериментів

№ з/п	Фактори	Кодоване позначення	Рівні варіювання		
			-1	0	+1
1	Вміст РПП, % від маси цементу	x_1	0,5	1,75	3
2	Вміст С-3, % від маси цементу	x_2	0	0,5	1,0
3	Масове співвідношення піску і цементу, n	x_3	2	3	4
4	Золо-цементне відношення, З/Ц	x_4	0	0,35	0,7
5	Відношення маси дисперсної мінеральної добавки (МК або ЗД) до маси золи-виносу	x_5	0	0,15	0,3

Таблиця 3.19

Рівняння регресії для властивостей розчинових сумішей

Властивість	Вид мінерального компонента ПФМ	Рівняння
Водопотреба, л/м ³	МК	$B = 242,5 - 12,5X_1 - 29,6X_2 + 5,67X_3 - 1,3X_4 + 9,37X_5 + 8,94X_1^2 + 3,94X_2^2 + 8,94X_3^2 + 3,44X_4^2 + 5,07X_5^2 - 4,13X_1X_2 + 8,38X_1X_3 - 15,9X_2X_3 - 5,9X_4X_5 \quad (3.23)$
	ЗД	$B = 229,8 - 11,9X_1 - 18,5X_2 + 4,67X_3 - 1,7X_4 + 7,8X_5 + 5,63X_1^2 + 2,63X_2^2 + 10,1X_3^2 + 1,13X_4^2 + 3,73X_5^2 - 4,88X_1X_2 + 10,1X_1X_3 - 21,4X_2X_3 - 4,9X_4X_5 \quad (3.24)$
Водовідділення, %	МК	$B_{вд} = 1,22 - 0,033X_1 + 0,44X_2 - 0,35X_3 - 0,37X_4 - 0,73X_5 - 0,061X_1^2 + 0,039X_2^2 - 0,061X_3^2 + 0,039X_4^2 + 0,089X_5^2 + 0,263X_1X_2 \quad (3.25)$
	ЗД	$B_{вд} = 1,76 - 0,033X_1 + 0,461X_2 + 0,411X_3 - 0,33X_4 - 0,61X_5 - 0,147X_1^2 + 0,203X_2^2 - 0,047X_3^2 + 0,047X_4^2 + 0,103X_5^2 + 0,10X_1X_2 + 0,20X_1X_3 \quad (3.26)$

При визначенні водопотреби рухомість розчинових сумішей приймали 10...12 см по зануренню стандартного конуса, водовідділення визначали після відстоювання у мірній посудині, повітрявтягування – об'ємним способом.

Як і слід очікувати найбільш істотне зниження водопотреби має місце при збільшенні в складі ПФМ вмісту суперпластифікатора (рис. 3.27). При цьому вплив СП істотно позначається вже при дозуванні 0,5% маси цементу (зменшення водопотреби близько 12..17%). Загальне зменшення водопотреби при максимальному вмісті СП 1% може досягати 28%.

Водний розчин РПП Mowilith можна віднести в досліджуваній області полімерцементних відношень до порівняно слабких пластифікаторів (рис. 3.27). При дозуванні до 1% він викликає практично невідчутне зниження водопотреби, при 3% воно становить близько 8...10%. За літературними даними [120] полівінілацетатна дисперсія пластифікує розчини при її введенні до 8%. Проте при подальшому збільшенні її вмісту до 20% водопотреба може знову зростати і відповідно зменшується рухомість розчинових сумішей.

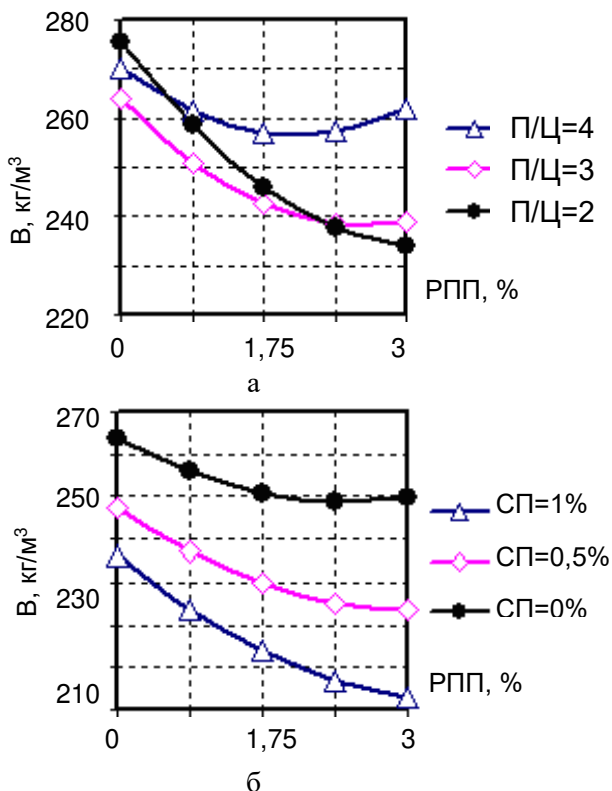


Рис. 3.27. Розрахункові залежності водопотреби розчинових сумішей з добавками ПФМ від вмісту РПП ($З/Ц = 0,35$):
 а) при використанні МК ($СП=0,5\%$, $МК/З = 0,15$);
 б) при використанні ЗД ($П/Ц=3$, $ЗД/З = 0,15$)

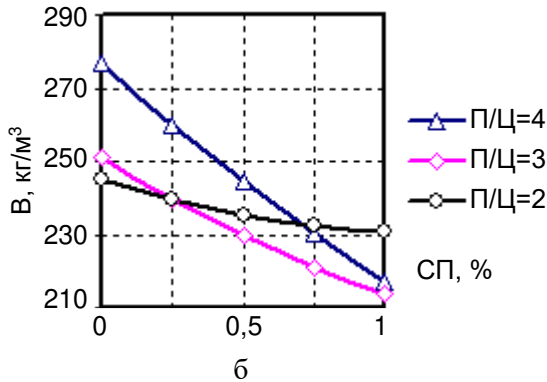
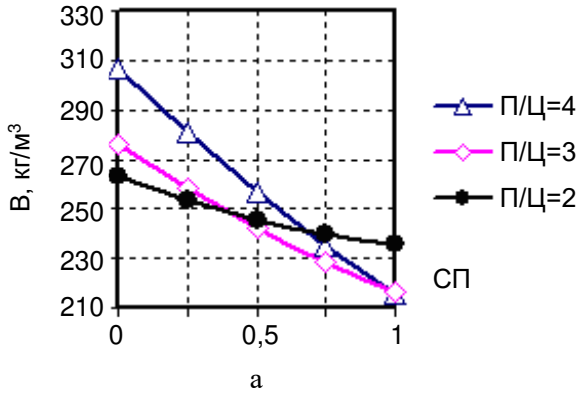


Рис. 3.28. Розрахункові залежності водопотреби розчинових сумішей з добавками ПФМ від вмісту суперпластифікатора ($Z/C = 0,35$, РПП = 1,75%):
 а) при використанні МК ($MK/Z = 0,15$);
 б) при використанні ЗД ($ZD/Z = 0,15$)

Водопотреба розчинових сумішей суттєво (до 14%) збільшується із збільшенням у складі ПФМ частки високодисперсної мінеральної добавки, особливо мікрокремнезему (рис. 3.29). Збільшення вмісту СП у складі ПФМ нівелює вплив кремнеземистої добавки. Необхідно відмітити певне зниження (до 4...7%) водопотреби розчинових сумішей із збільшенням золоцементного відношення (рис. 3.30а),

що обумовлене певним пластифікуючим ефектом золи-виносу [29].

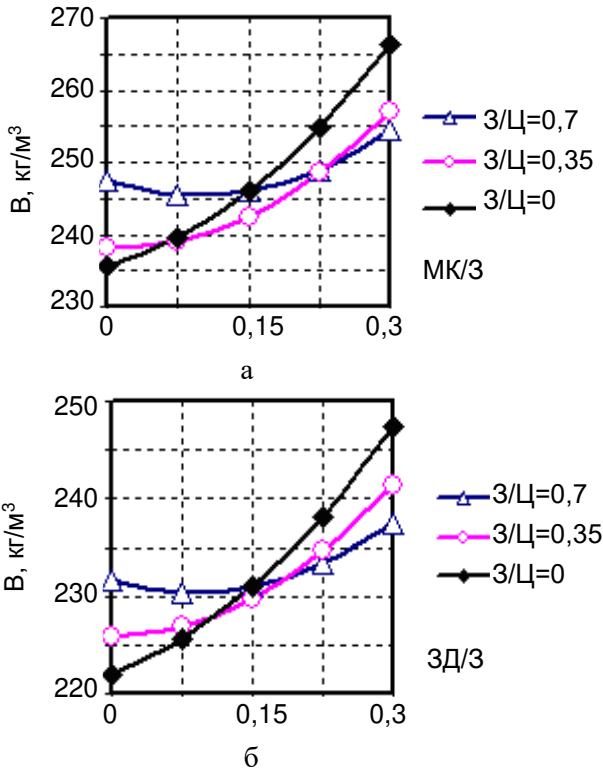


Рис. 3.29. Розрахункові залежності водопотреби розчинових сумішей від вмісту високодисперсного наповнювача у складі ПФМ (РПП = 1,75%; СП = 0,5%; П/Ц = 3): а) при використанні МК; б) при використанні ЗД.

Водопотреба розчинових сумішей зростає при збільшенні масового співвідношення піску і цементу (рис. 3.30 б), а також при зменшенні крупності піску. Так, при збільшенні відношення П/Ц від 2 до 4 водопотреба досліджуваних розчинових сумішей зросла на 42 кг/м³ (18%) для піску з $M_{кр}=1,38$ і майже на 70 кг/м³ (28%) для піску з $M_{кр}=1,15$.

Відомо, що введення в цементні розчини золи-виносу позитивно відбивається на їх водоутримуючій здатності.

Визначення водоутримуючої здатності розчинів здійснювали шляхом нанесення шару розчинової суміші завтовшки 10...12 мм на фільтрувальний папір. Після витримки протягом 10 хв визначали кількість води, яка була поглинута основою. Водоутримуюча здатність визначалась у відсотках як відношення різниці вологості в шарі до і після експерименту до початкового значення.

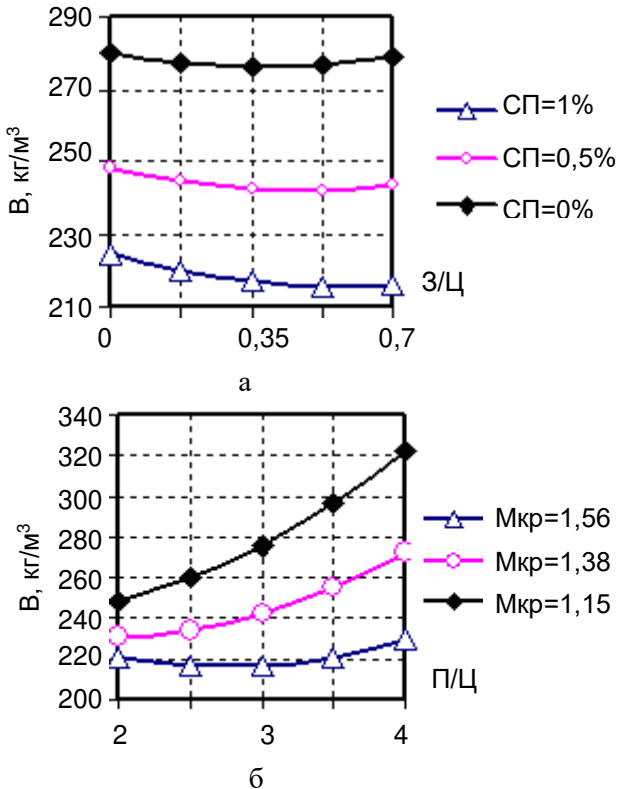


Рис. 3.30. Розрахункові залежності водопотреби розчинових сумішей від золоцементного відношення (а) та модуля крупності піску (б)

Позитивний вплив золи-виносу на водоутримуючу здатність розчинових сумішей підтверджується і аналізом отриманих математичних моделей. Додатковий ефект

спостерігається під час введення до складу ПФМ високодисперсних мінеральних компонентів (рис. 3.29).

Зокрема, при збільшенні З/Ц до 0,7 та вмісту високодисперсного кремнеземистого компонента до 30% від маси золи водовідділення зменшується до 1,3% для розчинів, що містять домелену золу та до 0,5% для розчинів з мікрокремнеземом.

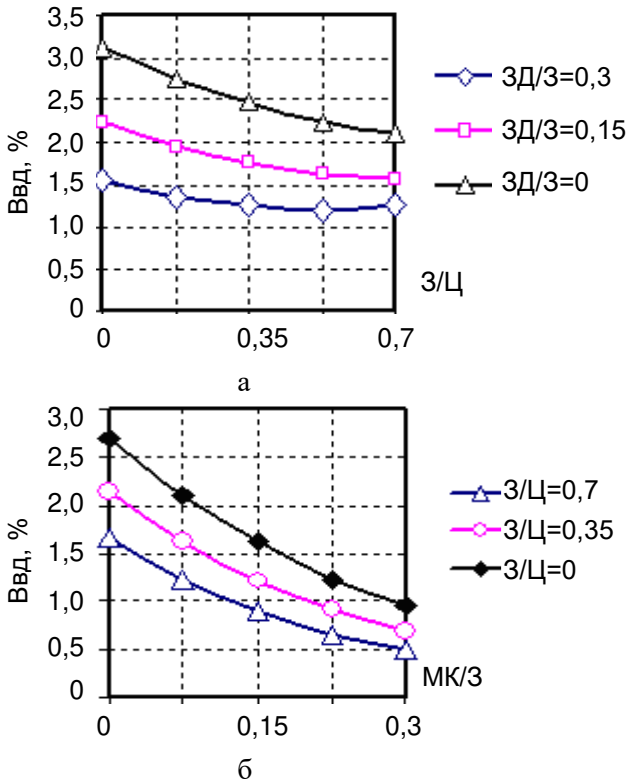


Рис. 3.31. Залежність водовідділення розчинових сумішей при різному співвідношенні ЗД/З (а) та відношення маси МК до маси золи (б) при РПП=1,75%; СП=0,5%; П/Ц=3

Про вплив суперпластифікаторов на водовідділення розчинових сумішей є суперечливі дані [117]. Відповідно до

наших експериментальних даних при дозуванні суперпластифікатора до 0,5% водовідділення розчинових сумішей практично не збільшується, а потім має тенденцію до зростання (рис. 3.32). В той же час наявність полімерної добавки забезпечує зниження водовідділення у всьому інтервалі дозувань від 0,5 до 3%.

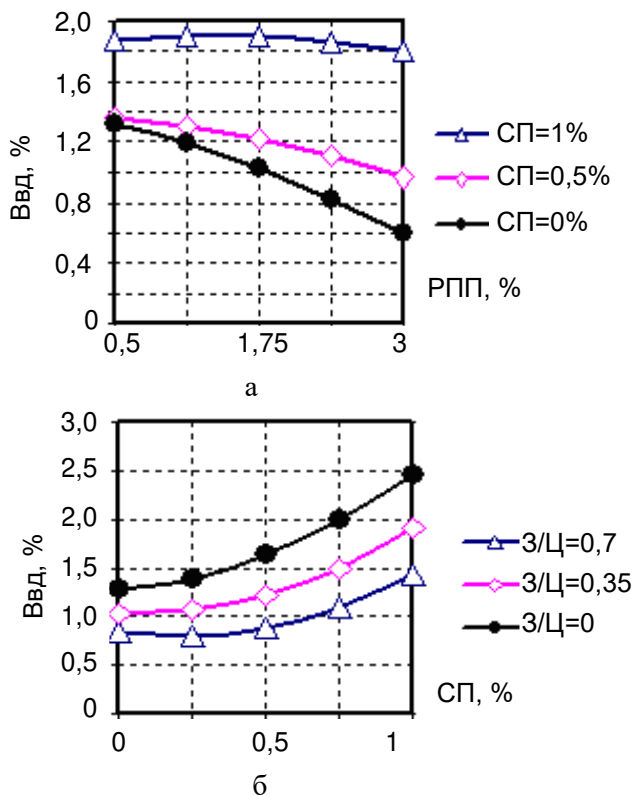


Рис. 3.32. Залежність водовідділення розчинових сумішей від вмісту: а – РПП; б – суперпластифікатора при П/Ц = 3; 3/Ц = 0,35; МК/З = 0,15

Наявність у складі ПФМ обох компонентів призводить до помітного збільшення водоутримуючої здатності сумішей. Здебільшого це можна пояснити повітрявтягувальною здатністю

досліджуваних полімерних добавок. Зі збільшенням вмісту РПП від 0,5 до 3% у розчинів суміші втягується додатково більше 1% повітря і загальний повітрявміст в них зростає до 3% у сумішах, які містять МК і до 3,5% у сумішах з ЗД (рис. 3.33).

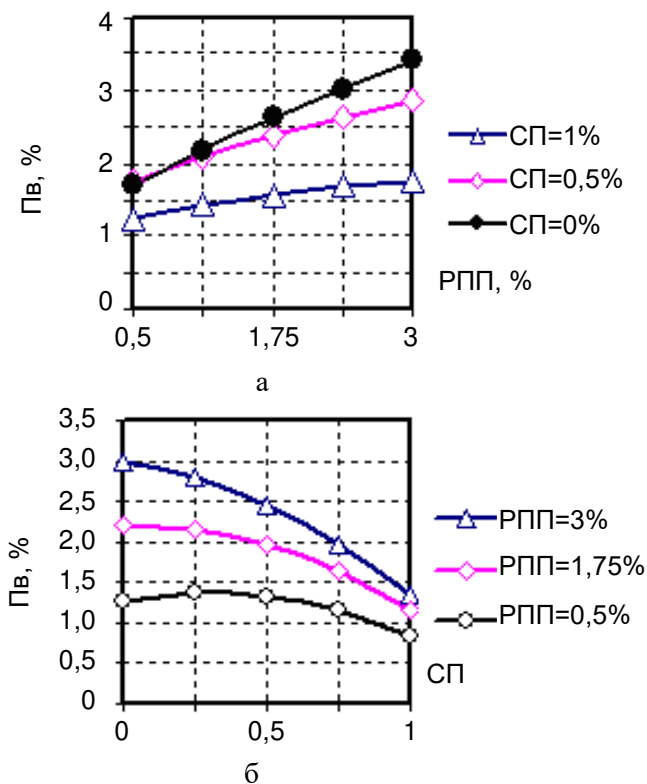


Рис. 3.33. Залежність повітрявтягування розчинових суміщей, які містять у складі ПФМ:
 а – домелену золу ($ЗД/З=0,15$);
 б – мікрокремнезем ($МК/З=0,15$), від вмісту РПП та суперпластифікатора

Суттєвий вплив на водоутримуючу здатність розчинів з добавками ПФМ простежується при збільшенні золоцементного відношення і, особливо, при введенні до складу ПФМ

високодисперсних добавок – мікрокремнезему і домеленої золи. Мінеральні добавки в сполученні з органічними компонентами ПФМ дозволяють забезпечити водоутримуючу здатність розчинів в межах 96...99%, необхідну для розчинів, придатних для закріплення облицювальних матеріалів.

Проведені дослідження по визначенню водоутримуючої здатності досліджених розчинів при використанні в якості основи різних матеріалів: важкого бетону, керамічної цегли, силіктної цегли, ніздрюватого бетону. Результати дослідів наведені в табл.3.20.

Таблиця 3.20

Водоутримуюча здатність розчинів

№ з/п	Склад розчинів	Основа	Водоутримуюча здатність, %
1.	Піщано-цементне відношення П/Ц = 3; золоцементне відношення З/Ц = 0,4; склад ПФМ: МК = 10%; РПП = 3%; СП = 0,7%	Бетон важкий, цегла керамічна, цегла силікатна, пінобетон ($\rho_0 = 800 \text{ кг/м}^3$)	98,5
			97,7
			98,1
			97,3
2.	Піщано-цементне відношення П/Ц = 3; золоцементне відношення З/Ц = 0,4; склад ПФМ: ЗД = 10%; РПП = 3%; СП = 0,7%	Бетон важкий, цегла керамічна, цегла силікатна, пінобетон ($\rho_0 = 800 \text{ кг/м}^3$)	98,1
			97,5
			97,8
			97,1

Наведені дані свідчать про те, що при використанні в якості основи характерних конструктивних і конструктивно-теплоізоляційних матеріалів розчини з добавками ПФМ забезпечують водоутримуючу здатність в необхідних межах.

Для кількісної оцінки впливу дисперсних кремнеземистих компонентів ПФМ на рухомість розчинових сумішей виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до плану На₆. В якості планованих факторів вибрані:

$$\begin{aligned}
X_1 &= v_{MK} / (v_{MK} + v_3); \\
X_2 &= (v_{MK} + v_3) / (v_{MK} + v_3 + v_{Ц}); \\
X_3 &= (v_{MK} + v_3 + v_{Ц}) / (v_{MK} + v_3 + v_{Ц} + v_B); \\
X_4 &= (v_{MK} + v_3 + v_{Ц} + v_B) / (v_{MK} + v_3 + v_{Ц} + v_B + v_{П}); \\
X_5 &= СП + РПП,
\end{aligned} \tag{3.27}$$

де v_{MK} , v_3 , $v_{Ц}$, v_B , v_3 – відповідно об'єми мікрокремнеземистої добавки (МК) чи добавки домеленої золи (ЗД), золи-виносу, цементу, води, піску, які витрачаються на виготовлення розчинової суміші;

СП та РПП – вміст у суміші суперпластифікатора та редиспергованого полімерного порошку, % маси цементу. Співвідношення СП : РПП = 1 : 2 за масою.

Вибір в якості планованих 4-х концентраційних факторів ($X_1 \dots X_4$), представлених об'ємними співвідношеннями, дозволяє: по-перше, дослідити вплив на рухомість суміші 5 параметрів складу – витрат високодисперсної добавки мікрокремнезему (МК) чи домеленої золи (ЗД), золи-виносу, цементу, води і піску (за умови $v_{MK} + v_3 + v_{Ц} + v_B + v_{П} = 1$), по-друге, застосувати поліструктурний метод технологічного аналізу, враховуючи, що кожний наступний фактор характеризує більш складний структурний рівень елементів розчинової суміші ніж попередній.

Перехід від об'ємних співвідношень до об'ємних і масових витрат окремих компонентів на 1 м^3 розчинової суміші здійснюється за формулами:

$$v_{MK} = X_1 X_2 X_3 X_4; \quad \text{МК (ДЗ)} = v_{MK} \rho_{MK} (\rho_{ЗД}); \tag{3.28}$$

$$v_3 = (1 - X_1) X_2 X_3 X_4; \quad З = v_3 \rho_3; \tag{3.29}$$

$$v_{Ц} = (1 - X_2) X_3 X_4; \quad Ц = v_{Ц} \rho_{Ц}; \tag{3.30}$$

$$v_B = (1 - X_3) X_4; \quad B = v_B \rho_B; \tag{3.31}$$

$$v_{зап} = 1 - X_4; \quad П = v_{П} \rho_{П}; \tag{3.32}$$

При розрахунках за формулами (3.28 – 3.32) приймали $\rho_{\text{МК}}=2100$, $\rho_3=2200$, $\rho_{\text{ц}}=3100$, $\rho_{\text{в}}=1000$, $\rho_{\text{п}}=2650$ кг/м³.

В табл. 3.21 наведені умови планування експериментів при дослідженні впливу вказаних вище факторів на рухомість розчинових сумішей з добавками ПФМ.

В області варіювання факторів витрата МК та ЗД коливалась від 0 до 94 кг/м³, золи від 0 до 215, цементу від 139 до 338, води від 180 до 328 кг/м³. Умови планування експериментів наведені у табл. 3.21.

Таблиця 3.21

Умови планування експериментів

Фактори	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
X ₁	0	0,25	0,5	0,25
X ₂	0,25	0,40	0,55	0,15
X ₃	0,40	0,50	0,60	0,10
X ₄	0,25	0,265	0,28	0,015
X ₅	0	1,5	3	1,5

Обробка отриманих експериментальних даних дозволила отримати математичні моделі рухомості розчинової суміші (за зануренням конуса, см):

– з добавкою МК у складі ПФМ:

$$\begin{aligned}
 ZK_1 = & 8,51 - 2,42X_1 + 1,51X_2 - 2,19X_3 + 2,03X_4 + 3,51X_5 - \\
 & - 0,85X_1^2 + 0,61X_2^2 - 1,25X_3^2 - 0,68X_4^2 - 0,62X_5^2 - 1,43X_1X_2 - \\
 & - 1,74X_1X_5 + 0,83X_2X_5 - 0,38X_3X_4 \quad (3.33)
 \end{aligned}$$

– з добавкою ЗД у складі ПФМ:

$$\begin{aligned}
 ZK_2 = & 9,25 - 1,74X_1 + 1,63X_2 - 2,05X_3 + 2,05X_4 + 3,43X_5 - \\
 & - 0,83X_1^2 + 0,63X_2^2 - 1,33X_3^2 - 0,63X_4^2 - 0,63X_5^2 - 1,47X_1X_2 - \\
 & - 1,34X_1X_5 + 0,74X_2X_5 - 0,33X_3X_4 \quad (6.23)
 \end{aligned}$$

Аналіз моделей дозволяє стверджувати, що найбільш впливовими факторами на рухомість розчинової суміші є X₁ – об'ємна частка високодисперсної складової у мінеральному наповнювачі та X₅ – вміст комплексної хімічної добавки ПФМ

(рис. 3.34). При цьому стрімке падіння рухомості має місце при $X_1 > 0,25$ і, особливо, в сумішах з пониженим вмістом хімічних добавок. Звертає увагу наявність в моделі істотних ефектів взаємодії між факторами X_1 та X_2 , X_1 та X_5 , що вказує на необхідність тісного взаємозв'язку при призначенні складів розчинових сумішей витрат високодисперсного наповнювача, золи і хімічних добавок.

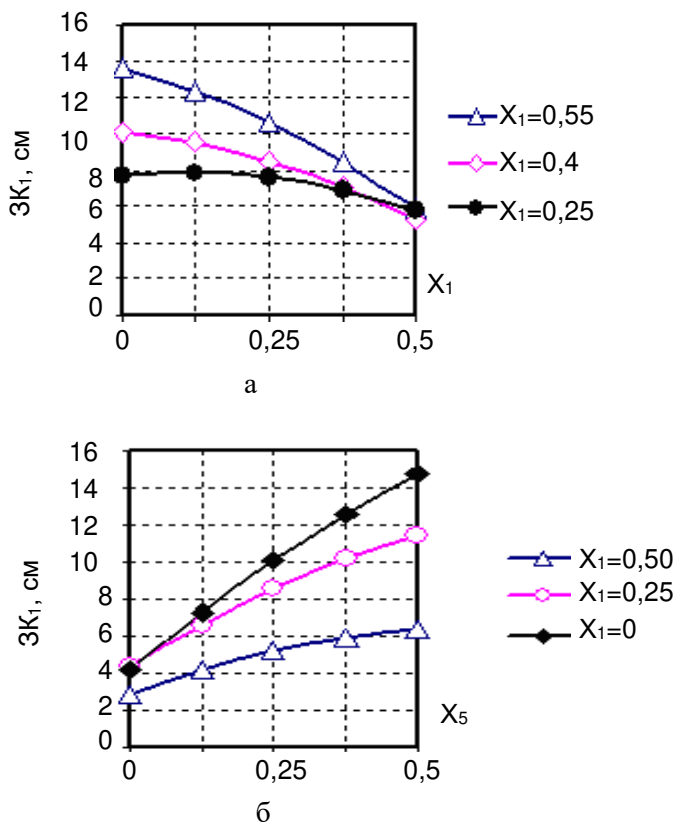


Рис. 3.34. Залежність рухомості розчинових сумішей від частки мікрокремнезему в мінеральному наповнювачі X_1 (а) та вмісту органічних компонентів (X_5) у складі ПФМ (б)

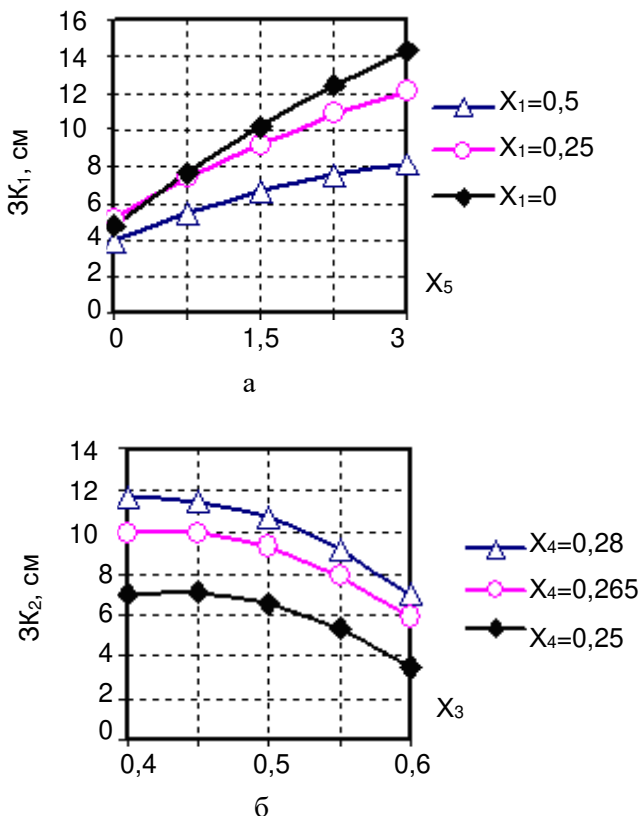


Рис. 3.35. Залежність рухомості розчинових сумішей, які містять ЗД, від вмісту органічних компонентів (X_5) у складі ПФМ (а) та частки в'язучого в наповненому цементному тісті X_3 (б)

Збільшення вмісту МК більш відчутно позначається на рухомості розчинових сумішей, ніж збільшення вмісту ЗД.

Характерно, що в межах $X_3=0,4...0,5$ рухомість розчинової суміші практично не змінюється, подальше збільшення об'ємної частки в'язучого в наповненому цементному тісті зменшує рухомість. Розрахунки за формулами 3.28 – 3.32, показують, що при $X_3=0,4...0,5$ в'язуче-водне відношення наповненої розчинової суміші не перевищує 2, тобто повинно бути справедливим правило постійності (сталості) водопотреби [118].

З моделі рухомості розчинової суміші також впливає, що, наприклад, при фіксуванні інших факторів на основному рівні зміна X_4 від -1 до $+1$ викликає зміну занурення конуса в межах $3...3,5$ см. Набагато більша зміна рухомості можлива при сумісній зміні факторів X_3 та X_4 , які характеризують вплив як кількості цементного тіста, так і його в'язкості, зумовленої вмістом у тісті наповненого в'язучого.

Для розчинових сумішей суттєве практичне значення має збереження їх рухомості у часі. Вивчали зміну занурення стандартного конуса в часі для сумішей із співвідношенням цемент:пісок=1:3 при температурі $20\pm 2^\circ$ С. Вміст суперпластифікатора приймали однаковим СП = 0,7%. Початкова рухомість суміші у всіх випадках становила 13,5...14 см. Результати дослідів наведені в табл. 3.22.

Таблиця 3.22

Зміна рухомості розчинових сумішей у часі

№ з/п	Фактори складу розчинової суміші					Рухомість, см, після заповнення конуса через, хв:					
	В/Ц	З/Ц	В, кг/м ³	МК/З (ЗД/З)	РПП, %	20	40	60	80	100	120
1	0,82	0,4	277	0,3	3	14	14	13,5	13	12,5	12
2	0,79	0,4	271	(0,3)	3	14	13,5	13	13	12	11,5
3	0,83	0,4	278	0,3	0,5	13,5	13,5	12,5	12	11,5	10,5
4	0,80	0,4	273	(0,3)	0,5	14	13,5	12,5	12	11	10
5	0,85	0,4	281	0,3	–	13	12,5	11	10,5	9,5	8
6	0,83	0,4	278	(0,3)	–	13	13	11,5	10	9	7,5
7	0,82	0,4	277	0,15	–	13	13	11,5	10	8,5	7
8	0,81	0,4	275	(0,15)	–	13,5	12,5	11,5	9,5	8	6,5
9	0,75	0,4	270	–	–	12	11	10	7	6,5	6
10	0,80	-	250	–	–	12	11	9	6,5	6	5

Досліди показали, що введення добавки ПФМ дозволяє забезпечити "життєздатність" клейових сумішей в необхідних межах і регулювати її при зміні кількості та складу добавок. Наповнення розчинової суміші МК та ЗД з одночасним введенням редиспергованого полімерного порошку (РПП) суттєво впливає на темп падіння рухомості. Так, початкова

рухомість розчинової суміші (12...14 см) при введенні тільки суперпластифікатора СП-3 (СП) зберігається 20 хв., у сумішах з добавкою МК + СП + РПП – більше 100 хв. Введення золи-виносу при $З/Ц \leq 0,4$ також позитивно позначається на збереженні рухомості. Позитивний вплив золи на стабілізацію легкоукладальності розчинових сумішей можна пов'язати з їх підвищеною водоутримуючою здатністю.

3.6. Адгезійні властивості цементно-зольних розчинів із добавками-модифікаторами

Сучасні уявлення про механізм адгезії і склеювання.

Однією з головних задач модифікування будівельних розчинів є збільшення їх адгезійної здатності, що сприяє підвищенню якості і довговічності кладки. Особливо важливим є забезпечення адгезійної здатності для клеєвих та мурувальних розчинів.

На теперішній час, ще немає загальноприйнятої теорії, яка б задовільно пояснювала процес склеювання. Внаслідок специфічності та різноманітності явищ, які виникають на різних етапах процесу склеювання, створення загальної теорії склеювання значно ускладнюється [94].

Однією з ранніх теорій, що була запропонована для пояснення процесу склеювання, є гіпотеза Мак-Бена [121], яка розглядає цей процес як механічне «заклинювання» клеючої речовини в пори (або в заглиблення) матеріалу який склеюють. Однак, положення, які висунув Мак-Бен, були спростовані в наступних роботах [103, 104].

Під адгезією прийнято розуміти зчеплення, яке виникає між двома приведеними до зіткнення різнорідними матеріалами. У випадку клеєних з'єднань адгезія – це зчеплення між клеючою речовиною і поверхнею, що склеюється. При розгляді адгезійних явищ необхідно враховувати і когезію – міцність самого клейового шву. Найбільше значення на теперішній час набули адсорбційна, електрична, дифузійна і хімічна теорії адгезії.

Адсорбційна теорія адгезії розглядає утворення зв'язку між клеючою речовиною (адгезивом) та склеюваним матеріалом (субстратом), як результат дії міжмолекулярних сил. Вперше на

значення адсорбційних явищ для процесу адгезії було вказано [97] ще в 1926р. Однак основи адсорбційної теорії адгезії були розроблені значно пізніше Дебройном [122] і Мак-Лареном [123, 124].

У відповідності з уявленнями Мак-Ларена утворення клеючого шару відбувається у дві стадії. На першій стадії проходить переміщення (міграція) молекул адгезива до поверхні субстрата і полярні групи молекул адгезива наближуються до полярних ділянок субстрату, на другій стадії відбувається сорбція. При достатньо близькій відстані між молекулами адгезива і субстрата починають діяти молекулярні сили (дисперсійні, індукційні, електростатичні), які призводять до утворення різних зв'язків (диполь-диполь, диполь-наведений диполь, водневий зв'язок та ін.).

Величина адгезії рідини до твердого тіла виражається наступним рівнянням [129; 130]:

$$W_a = \sigma(1 + \cos \varphi), \quad (3.35)$$

де W_a – робота адгезії;

σ – поверхневий натяг рідини;

φ – краєвий кут, утворений дотичною до поверхні краплі і твердої поверхні, на якій розміщена крапля.

Величина краєвого кута обернено пропорційна адгезії. Адгезія двох твердих тіл визначається роботою, яка витрачається для роз'єднання твердих поверхонь.

Електрична теорія адгезії, яку розвинули Б.В. Дерягін і Н.А. Кротова, ґрунтується на уявленні про подвійний електричний шар, який утворюється при тісному контакті двох поверхонь.

При відриві клеючих плівок виявили [104] явище електронної емісії, яка підтверджує електричну теорію адгезії. Був також встановлений зв'язок між швидкістю електронів і величиною адгезії [103]. Адсорбційні явища вважають важливими тому що в їх результаті виникає перерозподіл електронів на границі розподілу, що призводить до утворення подвійного електричного шару. На наступному етапі електрична теорія адгезії врахувала значення сил молекулярної взаємодії.

Електрична теорія адгезії не має універсального характеру і має певні недоліки [125]. З точки зору тільки цієї теорії важко, наприклад, пояснити збільшення адгезії при близькості природи матеріалів, які з'єднують один з одним. Чим ближче за своєю природою фази, які контактують, тим меншою повинна бути контактна різниця потенціалів.

У відповідності з хімічною теорією [126] адгезія різних матеріалів обумовлена виникненням хімічних зв'язків. Склеювання можна пояснити утворенням електровалентних іонних зв'язків, в сотні разів більш міцних, ніж міжмолекулярні сили. При найбільш сприятливих умовах склеювання, може виникнути хімічний зв'язок іншого типу – ковалентний.

Механізм адгезії тіл може характеризуватись також водневим зв'язком, що розглядається як побічна валентність водневого атома, яка проявляється по відношенню до атомів фтору, кисню, азоту.

Найбільш високою енергією характеризуються хімічні, меншою мірою водневі, електростатичні, дисперсійні та індукційні зв'язки.

Жодна з вказаних теорій склеювання не є універсальною. Хоча, на теперішній час, не віддають перевагу жодній з цих теорій, можна констатувати, що кожна з них вносить свій внесок у загальну теорію механізму склеювання.

При формуванні клеючої плівки відбуваються усадочні явища, які призводять, як правило, до виникнення внутрішніх напружень, що негативно впливають на міцність клеючих з'єднань. Величина усадки та внутрішніх напружень залежить як від хімічної природи і властивостей сполук, що є основою клеючої композиції, так і від характеру і умов процесів, які відбуваються при утворенні клеєвого з'єднання. Багатьма дослідженнями встановлено, що зі зменшенням товщини плівки [126] підвищується міцність клеєвого з'єднання [105, 126].

Поряд із введенням полімерних добавок відомий ряд способів покращення клеючої здатності цементного каменя при обмеженні його вмісту в бетоні. Один з них заснований на концепції, що розглядає цементний камінь як мікробетон [69]. У відповідності до цієї концепції доцільно підвищувати

дисперсність цементного клею, забезпечуючи його повну гідратацію. Зерна цементу крупністю більше 40 мкм, які практично не гідратуються, раціонально замінити наповнювачами. На цій концепції ґрунтуються технології сухого та мокрого домолу цементу сумісно з піском та іншими наповнювачами, одержання колоїдного цементного клею [84;93]. Домол цементу, однак, не одержав розповсюдження в зв'язку з високою енергоємністю, недосконалістю конструкції помольних агрегатів, швидкою втратою активності. Застосування колоїдного цементного клею, який одержують з використанням вібраційних млинів та змішувачів, обмежується дуже вузькою областю клеючих сумішей.

Значний розвиток одержали дослідження по активації цементного в'язучого, а також суміші цементу з наповнювачами [83, 84, 93].

Найбільшою мірою методи активації розроблені стосовно цементу. Основними з них є домол, віброактивація, турбулентна, акустична, ультразвукова, термічна, аеротермічна, електроімпульсна обробка та ін [84, 93, 88].

В даний час є ряд рекомендацій щодо активізації в'язучих і наповнювачів за рахунок модифікування поверхні різними хімічними речовинами, у тому числі і ПАР, галоїдовмісними, кремнійорганічними речовинами та ін [83, 84, 93].

Більшість способів, що підвищують поверхневу активність в'язучих, прийнятна і для наповнювачів. Класифікація способів активації наповнювачів та вплив активації на механічні властивості цементних бетонів наведені у роботі [83].

Сутність механічних способів активації полягає в підвищенні реакційної здатності порошків за рахунок розкриття нових активних поверхонь зерен, зміни кристалічної структури мінералів, утворення великої кількості ненасичених валентних зв'язків, а при глибокому подрібненні – їх аморфізації. У найбільш поширених випадках поверхнева енергія наповнювача E_n нижча поверхневої енергії зерен в'язучого E_v ($E_v/E_n > 1$). Відносне співвідношення між розміром частинок наповнювача d_n і зернами в'язучого d_v в цих випадках рекомендується в межах $d_n/d_v = 3...10$ [34]. Ці рекомендації розроблені на основі уявлень

про утворення кластерів і поетапної організації структури композиційного матеріалу. У тих випадках, коли поверхнева активність наповнювача вища поверхневої активності в'язучого, оптимальний розмір частинок наповнювача, що рекомендується, має відповідати розмірам зерен цементу. Подальше зменшення діаметру частинок наповнювача збільшує імовірність їхнього об'єднання у власні кластерні структури, що призводить до розвитку внутрішніх поверхонь розділу і тріщиноутворення. Величина поверхні розділу фаз наповнювач – в'язуче в одиниці об'єму може характеризуватися параметром, пропорційним ступеню наповнення, дисперсності і поверхневій активності наповнювача [93].

Доцільність активації наповнювача шляхом модифікування його поверхні добавками ПАР впливає з рівняння Дюпре-Юнга [127], що зв'язує роботу адгезії $W_{ад}$ з поверхневою енергією твердого тіла:

$$W_{ад} = \sigma_T - \sigma_T^* (m + \cos \theta), \quad (3.36)$$

де σ_T – поверхнева енергія твердого тіла;

σ_T^* – вільна поверхнева енергія твердого тіла в атмосфері парів і газів;

$m = \sigma_p^*/\sigma_p > 1$ (σ_p^* – поверхневий натяг рідини, орієнтований під впливом силового поля твердої поверхні; σ_p – поверхневий натяг змочувальної рідини);

θ – крайовий кут змочування.

З рівняння випливає, що для досягнення високої адгезійної міцності важливо забезпечити необхідну змочуваність наповнювача зв'язуючим і зменшити міжфазову поверхневу енергію, що досягається обробкою наповнювача ПАР. Зменшення міжфазової поверхневої енергії при створенні адсорбційно-активного середовища визначається з рівняння:

$$\Delta v_{т,р} = K T \int_0^c n_s(c) d \ln c, \quad (3.37)$$

де $\Delta v_{т,р}$ – різниця міжфазної поверхневої енергії без ПАР і в присутності ПАР з концентрацією c ;

n_s – величина адсорбції, обумовлена кількістю молекул ПАР, що адсорбовані на 1 см^2 поверхні розділу фаз;

K – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура, $^{\circ}\text{K}$.

Необхідною умовою ефективності ПАР є здатність до хемосорбційного впливу на поверхню частинок наповнювача. У загальному випадку рекомендуються [93] для мінеральних наповнювачів кислотного типу катіоно-активні ПАР, а основного типу – аніоноактивні.

Адгезійна міцність цементно-зольних розчинів з добавками ПФМ. Адгезійну здатність цементно-зольних розчинів визначали як міцність на відрив від бетонної основи зразка розміром 50×50 мм, випиляного з керамічної плитки. Вплив водоцементного (В/Ц) та золоцементного (З/Ц) відношення, а також виду та вмісту досліджуваних добавок вивчали за допомогою експериментів, алгоритмізованих відповідно до плану B_4 (табл. 3.23). Математичною обробкою їх результатів отримані експериментально-статистичні моделі адгезійної міцності (3.38...3.41) наведені в табл. 3.24. Для аналізу отриманих моделей побудовані двофакторні графічні залежності та поверхні відгуку адгезійної міцності (рис. 3.36...3.38).

Вивчали вплив на величину адгезійної міцності додаткового домолу золи, а також співвідношення цементно-зольне в'язуче : заповнювач. Результати дослідів наведені в табл. 3.35 та на рис. 3.39.

Таблиця 3.23

Умови планування експериментів при дослідженнях адгезійних і міцносних властивостей модифікованих цементно-зольних розчинів

Технологічні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
В/Ц	X ₁	0,6	0,8	1,0	0,2
З/Ц	X ₂	0	0,35	0,7	0,35
Вміст суперпластифікатора СП-3, % маси цементу	X ₃	0	0,35	0,7	0,35
Вміст повітрявтягувальної добавки, % маси цементу	X _{4(I)}	0	0,025	0,05	0,025
Вміст водоутримуючої добавки Tylose (ЕЦ), % маси цементу	X _{4(II)}	0	0,15	0,3	0,15

Таблиця 3.24

Математичні моделі адгезійної міцності цементно-зольних розчинів

Добавка	Математичні моделі адгезійної міцності
ПФМ ₁ (СП-3 + ПД)	$R_{ад,7} = 0,356 - 0,028X_1 + 0,035X_3 + 0,017X_4 - 0,0459X_1^2 - 0,0459X_2^2 - 0,0209X_3^2 - 0,0459X_4^2 - 0,004X_1X_2 \quad (3.38)$
	$R_{ад,28} = 0,639 - 0,028X_1 + 0,018X_2 + 0,057X_3 + 0,026X_4 - 0,0792X_1^2 - 0,074X_2^2 - 0,0542X_3^2 - 0,0542X_4^2 + 0,004X_1X_2 + 0,004X_1X_4 + 0,011X_2X_3 \quad (3.39)$
ПФМ ₂ (СП-3 + ЕЦ)	$R_{ад,7} = 0,392 - 0,027X_1 + 0,007X_2 + 0,036X_3 + 0,034X_4 - 0,0574X_1^2 - 0,0424X_2^2 - 0,0224X_3^2 - 0,0424X_4^2 + 0,002X_1X_4 + 0,002X_3X_4 \quad (3.40)$
	$R_{ад,28} = 0,706 - 0,030X_1 + 0,021X_2 + 0,060X_3 + 0,052X_4 - 0,097X_1^2 - 0,067X_2^2 - 0,067X_3^2 - 0,067X_4^2 + 0,006X_1X_2 + 0,006X_1X_4 + 0,016X_2X_3 + 0,003X_3X_4 \quad (3.41)$

Аналіз отриманих моделей адгезійної міцності показує, що вплив на неї як В/Ц, так і З/Ц має екстремальний характер (рис. 3.36). Так, при збільшенні В/Ц розчину від 0,6 до 0,7...0,75 адгезійна міцність зростає на 8...10%, при подальшому збільшенні В/Ц вона зменшується на 20...25% від максимального значення. При цьому максимум $R_{ад.}$ спостерігається при З/Ц = 0,35...0,4. Такий вплив згаданих технологічних факторів на адгезію можна пояснити впливом не тільки пористості контактної шару, але й ступеня змочування розчином основи.

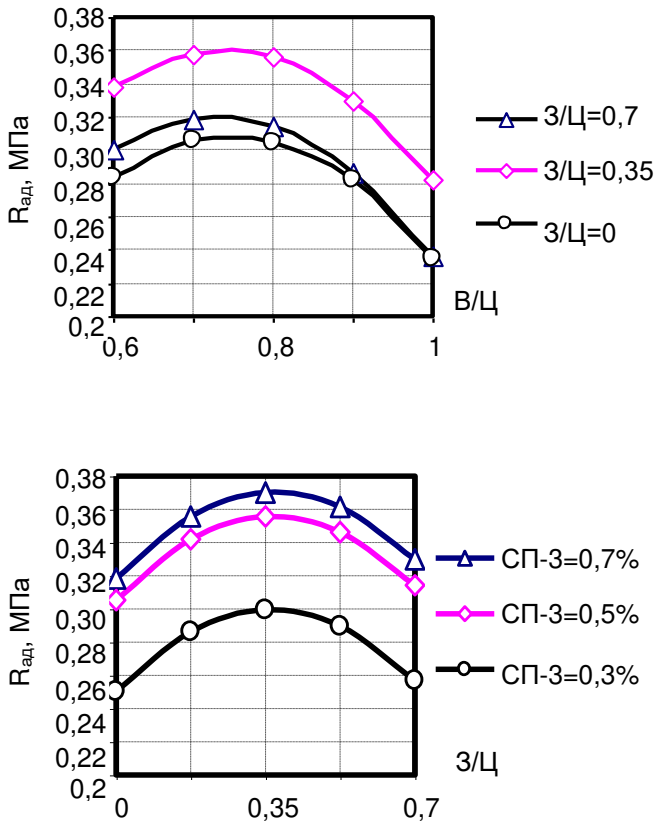


Рис. 3.36. Залежність адгезійної міцності (МПа) цементно-зольних розчинів, модифікованих ПФМ₁, від водо-та зоцементного відношення у віці 7 діб

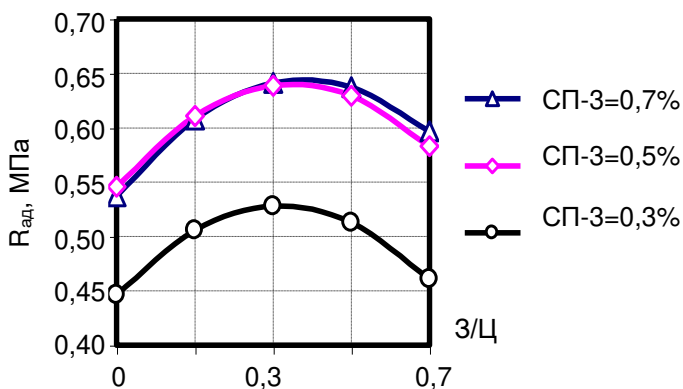
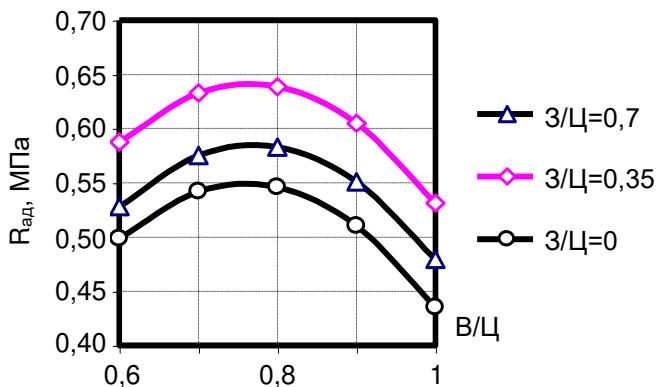


Рис. 3.37. Залежність адгезійної міцності (МПа) цементно-зольних розчинів, модифікованих ПФМ₁, від водо- та золоцементного відношення у віці 28 днів

Суперпластифікатор СП-3 та повітрявтягувальна добавка Міх-ДН, позитивно впливають на адгезію розчинів (рис. 3.38) як в результаті зміни їх поверхневої енергії, так і в результаті зміни якісних характеристик контактного шару. Введення гідрофільної добавки СП-3 покращує характеристики контактного шару розчину, очевидно, насамперед збільшення його змочуваності і зменшення вмісту надлишкової вологи. При збільшенні вмісту

суперпластифікатора з 0 до 0,35% від маси цементу адгезійна міцність зростає на 16...35% при В/Ц = 0,6 та на 25...40% при В/Ц = 1,0. Подальше збільшення вмісту СП-3 до 0,7% приводить до збільшення $R_{ад}$ ще на 13...20%.

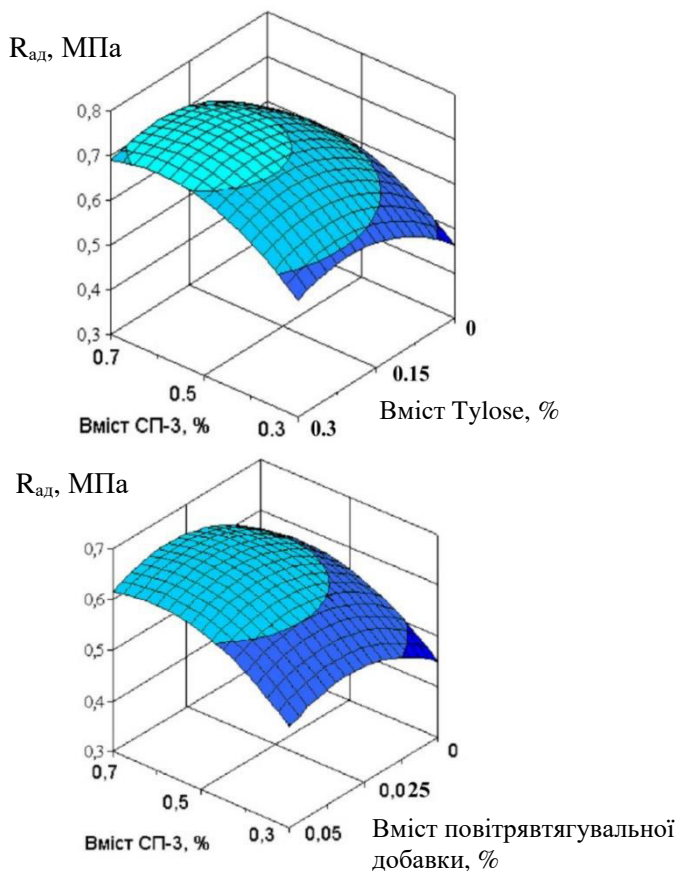


Рис. 3.38. Залежність адгезійної міцності (МПа) цементно-зольних розчинів у віці 28 діб від вмісту добавок-модифікаторів

Введення в розчини повітрявтягувальної і, особливо, полімерної добавки Tylose забезпечує необхідну водоутримуючу здатність розчинової суміші і знижує товщину необхідного

клеєвого шару, що також позитивно позначається на величині адгезії. За інших рівних умов збільшення вмісту повітровтягувальної добавки від 0 до 0,025% від маси цементу збільшує адгезійну міцність на 30...45%, при подальшому збільшенні вмісту ПД адгезійна міцність дещо знижується. Збільшення вмісту водоутримуючої добавки Tylose від 0 до 0,15% приводить до зростання адгезійної міцності на 25...55%, подальше зростання вмісту добавки слабо впливає на адгезію золівмісних розчинів.

Додатковим фактором, який сприяє збільшенню адгезійної міцності розчинів, служить збільшення дисперсності золи-виносу (табл. 3.25, рис. 3.39). Так, домол золи до питомої поверхні (S_3) 390 м²/кг дозволяє збільшити міцність зчеплення розчину з основою у віці 7 діб на 14...26%, у віці 28 діб – на 13...18%.

Таблиця 3.25

Адгезійна міцність модифікованих цементно-золиних розчинів з використанням золи різної дисперсності

(Ц+З)/П	S_3	Адгезійна міцність, МПа, у віці	
		7 діб	28 діб
Модифікатор ПФМ ₁ (В/Ц = 0,8; З/Ц = 0,6; СП-3 = 0,5%; ПД = 0,03%)			
1 : 3	290	0,34	0,60
	340	0,38	0,66
	390	0,43	0,71
1 : 4,5	290	0,28	0,53
	340	0,32	0,57
	390	0,35	0,62
Модифікатор ПФМ ₂ (В/Ц = 0,8; З/Ц = 0,6; СП-3 = 0,5%; ЕЦ = 0,3%)			
1 : 3	290	0,38	0,64
	340	0,42	0,69
	390	0,45	0,73
1 : 4,5	290	0,29	0,55
	340	0,31	0,59
	390	0,33	0,62

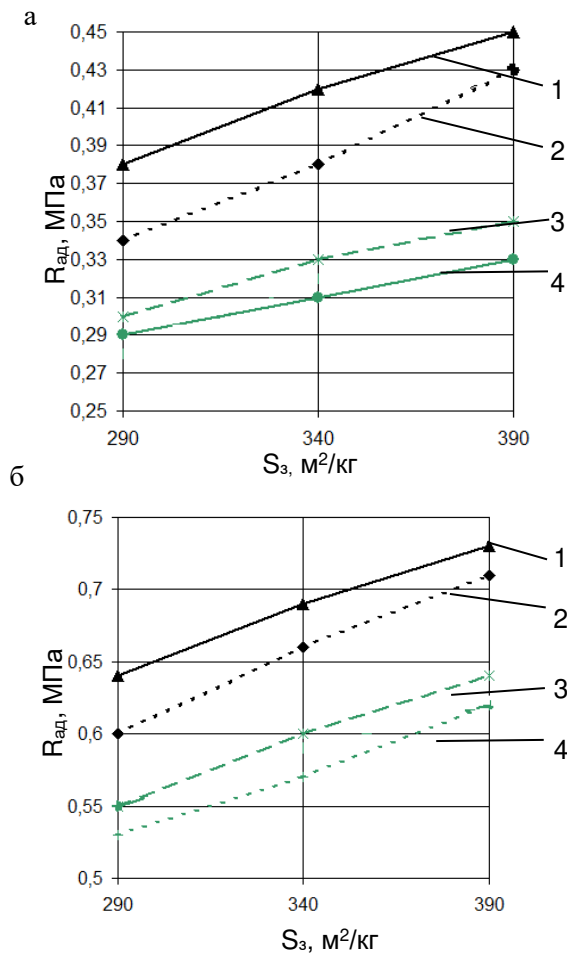


Рис. 3.39. Залежність адгезійної міцності модифікованих цементно-зольних розчинів від дисперсності золи та співвідношення в'язуче : пісок: а – у віці 7 діб, б – у віці 28 діб:
 1, 2 – (Ц+3) : П = 1 : 3; 3, 4 – (Ц+3) : П = 1 : 4,5;
 1, 4 – ЕЦ = 0,15%, пісок з $M_k = 1,42$;
 2, 3 – ПД = 0,025%, пісок з $M_k = 1,42$

Відомо, що нові свіжоутворені поверхні мінеральних матеріалів мають значно вищі значення поверхневої енергії, що обумовлює їх вищу адгезійну активність. Механічні процеси при помелі мінеральних і органічних матеріалів викликають, поряд зі збільшенням їх поверхневої енергії, зростання ізобарного потенціалу порошоків і, відповідно, їх хімічної активності, що також сприяє високій адгезійній міцності при контакті їх з в'язучим. Слід, втім, враховувати схильність молотих порошоків до швидкого дезактивування. Тривалість існування у повітряному середовищі радикалів, які виникають при механо-хімічній обробці, складає всього $10^{-3} \dots 10^{-6}$ с [86]. Адсорбція свіжомеленими порошками водяної пари та вуглекислого газу з повітря та насичення незкомпенсованих молекулярних сил приводить не тільки до "старіння" поверхні наповнювачів, але і служить додатковою перепороною для утворення надійних адгезійних контактів. Через це механо-хімічна активація наповнювачів ефективна при створенні на їх зернах первинного контактного шару структурованого в'язучого безпосередньо у процесі помелу.

Зміна співвідношення цементно-зольного в'язучого та піску також впливає на величину адгезійної міцності (рис. 3.39).

Вплив дисперсних кремнеземних добавок на адгезійну міцність розчинів. Досліди щодо впливу кремнеземистих добавок (КД) на адгезійну міцність розчинів виконували відповідно до факторного плану Na_5 . Водопотребу розчинової суміші підбирали для досягнення необхідного занурення стандартного конуса 10...12 см. Експериментально-статистичні моделі адгезійної міцності розчинів наведені нижче:

– з добавкою МК у складі ПФМ:

$$R_{ад,28(МК)} = 2,52 + 0,62X_1 + 0,31X_2 - 0,27X_3 + 0,33X_4 + 0,51X_5 + 0,35X_1^2 - 0,06X_2^2 - 0,13X_3^2 - 0,48X_4^2 - 0,23X_5^2 - 0,13X_1X_2 - 0,34X_1X_5 + 0,23X_2X_5 \quad (3.42)$$

– з добавкою ЗД у складі ПФМ:

$$R_{ад,28(ЗД)} = 2,15 + 0,59X_1 + 0,28X_2 - 0,26X_3 + 0,33X_4 + 0,40X_5 + 0,33X_1^2 - 0,09X_2^2 - 0,13X_3^2 - 0,43X_4^2 - 0,28X_5^2 - 0,15X_1X_2 - 0,27X_1X_5 + 0,25X_2X_5 \quad (3.43)$$

$$\text{де: } X_1 = (РПП - 1,75)/1,25;$$

$$X_2 = (С-3 - 0,5)/0,5;$$

$$X_3 = (Ц/П - 3)/1;$$

$$X_4 = (З/Ц - 0,35)/0,35;$$

$$X_5 = (КД - 0,15)/0,15.$$

Аналіз отриманих моделей показує, що у діапазоні варіювання досліджуваних факторів величина адгезійної міцності розчинів з ПФМ, які містять мікрокремнеземисту добавку (МК), коливається в межах 0,3...4,0 МПа, домелену золу виносу – 0,3...3,1 МПа.

Досліджувані фактори за впливом на величину адгезійної міцності можна розмістити у наступний спадаючий ряд: РПП > МК (чи ЗД) > З/Ц > СП > Ц/П. Збільшення вмісту РПП у складі ПФМ з 0,5 до 3% за інших рівних умов дозволяє підвищити адгезійну міцність розчину на 1,5 МПа або на 60...85%. Підвищення частки МК у мінеральному компоненті ПФМ збільшує міцність зчеплення на 0,6...1,5 МПа (рис. 3.40), а частки ЗД у тих же межах – на 0,4...1,4 МПа залежно від вмісту суперпластифікатора і РПП.

Можна відмітити суттєвий вплив ефектів взаємодії таких факторів, як вміст суперпластифікатора та РПП, суперпластифікатора і високодисперсної кремнеземистої добавки. Очевидно, що досягнення високої адгезійної міцності розчинів можливе при відповідній оптимізації складу розчину і, особливо, складу органо-мінеральних модифікаторів.

Вказані висновки по характеру впливу досліджуваних факторів на адгезійну міцність розчинів при її стандартному визначенні справедливі і при визначенні міцності на зсув склеєних зразків ніздрюватого бетону. Досліди виконували з використанням зразків-кубів пінобетону з $\rho_0=830$ кг/м³ і $R_{сг}=3,5$ МПа розміром 7,07x7,07x7,07 см. Зразки склеювали розчином з товщиною шва 2...3 мм і витримували в нормальних

умовах протягом 28 діб. Результати дослідів при використанні характерних складів розчинів наведені в табл. 3.26.

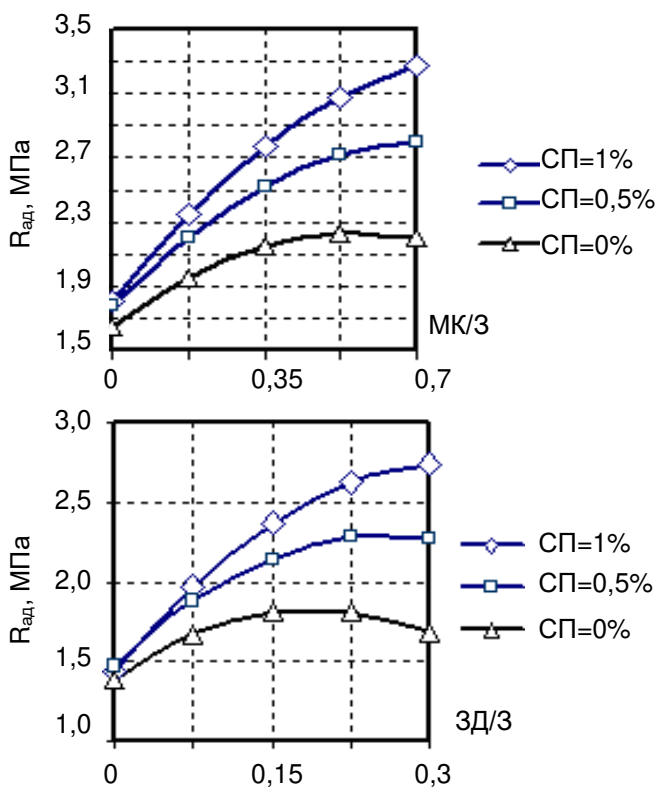


Рис. 3.40. Залежність адгезійної міцності розчинів від вмісту високодисперсних компонентів ПФМ

Для клейових розчинів, які працюють, наприклад, разом з кладкою в умовах поперемінного замороження і відтавання суттєве значення має зміна адгезійної міцності при дії знакозмінних температур. Для цієї мети склеєні зразки пінобетону піддавали 50 циклам поперемінного заморожування і відтавання відповідно до ДСТУ.

Таблиця 3.26

Міцність на зсув клейового шва

№ скла- ду	Склад розчину						Границя міцності клейового шва на зсув, МПа у віці 28 діб	
	В/Ц	З/Ц	В, кг/м ³	МК/З	ЗД/З	РПП	при твердінні у нормальних умовах	після 50 циклів замо- рожування - відтавання
1	0,8	-	250	-	-	-	2,8	2,4
2	0,75	0,4	270	-	-	-	3,1	2,5
3	0,82	0,4	277	0,15	-	-	3,8	3,3
4	0,85	0,4	281	0,3	-	-	4,5	4,1
5	0,81	0,4	275	-	0,15	-	3,5	2,9
6	0,83	0,4	278	-	0,3	-	4,1	3,6
7	0,83	0,4	279	0,3	-	0,5	5,1	4,7
8	0,82	0,4	277	0,3	-	3	5,8	5,3
9	0,80	0,4	273	-	0,3	0,5	4,8	4,5
10	0,79	0,4	271	-	0,3	3	5,5	5,1

Примітки: 1. У всі склади вводили СП у кількості 0,7% від маси цементу. 2. Співвідношення пісок : цемент прийняте рівним 3:1 за масою. 3. Для отримання розчинових сумішей використовували пісок з $M_k = 1,42$.

Наведені у табл. 3.26 результати випробувань показують, що зниження міцності на зсув клейового шва при випробуванні на морозостійкість коливається в інтервалі 5...20%, що можна вважати прийнятним [128]. Введення ПФМ позитивно впливає на адгезійну міцність розчинів як в нормальних умовах, так і при дії знакозмінних температур. Більш висока адгезійна міцність модифікованих розчинів у останньому випадку пов'язана з їх підвищеним повітрявтягуванням.

3.7. Міцність цементно-зольних розчинів з добавками ПФМ

Експлуатаційна надійність мурувальних та клейових розчинів поряд з їх адгезією до поверхонь, на які вони наносяться, характеризується величиною когезії, яка визначає міцнісні показники розчину.

Дослідження міцності модифікованих розчинів виконані шляхом реалізації алгоритмізованих експериментів. Статистичною обробкою результатів експериментів були отримані рівняння регресії міцності на стиск ($R_{ст}$) та міцності на згин ($R_{зг}$) зразків через 28 діб нормального твердіння, наведені у табл. 3.27, а графічні залежності, які їх ілюструють – на рис. 3.41...3.44.

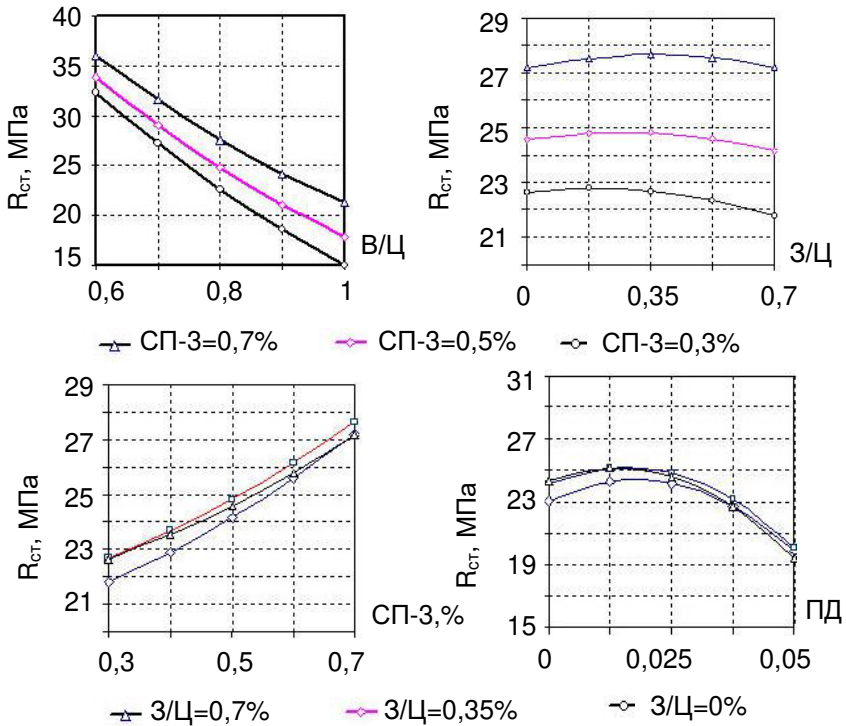


Рис. 3.41. Залежність міцності на стиск цементно-зольних розчинів, модифікованих ПД Міх-ДН від технологічних факторів

Таблиця 3.27

Математичні моделі міцності модифікованих
цементно-зольних розчинів

Добавка	Рівняння регресії
ПФМ ₁ (СП-3 + ПД)	$R_{ct} = 24,8 - 8,04X_1 + 1,207X_2 + 2,49X_3 - 2,03X_4 + 1,04X_1^2 -$ $- 0,458X_2^2 + 0,342X_3^2 - 2,71X_4^2 + 0,33X_1X_2 + 0,66X_1X_3 +$ $+ 0,23X_2X_3 + 0,44X_2X_4 - 0,18X_3X_4 \quad (3.44)$
	$R_{gr} = 3,74 - 0,986X_1 + 0,353X_3 - 0,252X_4 + 0,401X_1^2 -$ $- 0,151X_2^2 - 0,051X_3^2 - 0,449X_4^2 - 0,044X_1X_2 +$ $+ 0,056X_1X_4 \quad (3.45)$
ПФМ ₂ (СП-3 + ЕЦ)	$R_{ct} = 25,5 - 8,4X_1 + 1,106X_2 + 2,61X_3 - 1,62X_4 + 1,83X_1^2 -$ $- 1,62X_2^2 + 1,03X_3^2 - 1,87X_4^2 + 0,32X_1X_2 + 1,77X_1X_3 +$ $+ 1,21X_2X_3 - 0,18X_3X_4 \quad (3.46)$
	$R_{gr} = 3,93 - 0,935X_1 - 0,017X_2 + 0,291X_3 - 0,289X_4 +$ $+ 0,459X_1^2 - 0,267X_2^2 + 0,009X_3^2 - 0,491X_4^2 - 0,069X_1X_2 -$ $- 0,044X_1X_4 - 0,031X_3X_4 \quad (3.47)$

де: $X_1 = (В/Ц - 0,8)/0,2$; $X_2 = (З/Ц - 0,35)/0,35$; $X_3 = (СП - 0,35)/0,35$;
 $X_4 = (ВД - 0,025)/0,025$; $X_5 = (ЭЦ - 0,15)/0,15$.

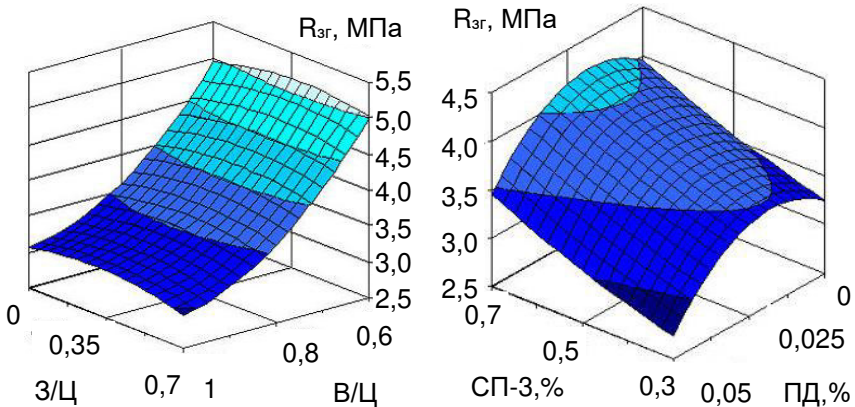


Рис. 3.42. Залежність міцності на згин цементно-зольних розчинів, модифікованих добавкою ПФМ₁ від технологічних факторів

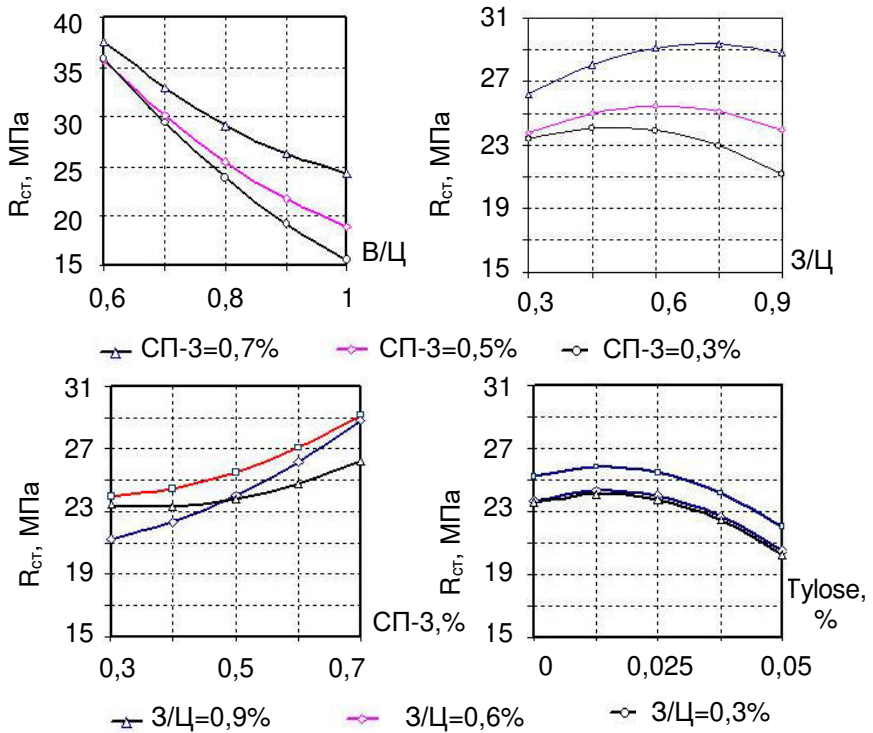


Рис. 3.43. Залежність міцності на стиск цементно-зольних розчинів, модифікованих добавкою ПФМ₂ від технологічних факторів

Аналіз отриманих рівнянь та графіків показує, що в досліджених цементно-зольних розчинах визначальний вплив на міцність як при стиску, так і при згині чинить V/C . Наступним за значимістю фактором є вміст суперпластифікатора. Помітну роль також відіграє золоцементне відношення, вплив якого як на міцність при стиску, так і на міцність при згині є екстремальним. Для усіх досліджених складів близьким до оптимального є $Z/C = 0,35 \dots 0,4$.

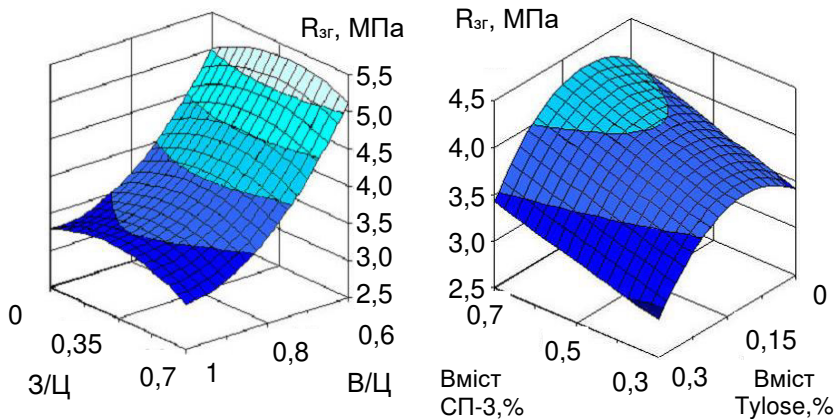


Рис. 3.44. Залежність міцності на згин цементно-зольних розчинів

Позитивний вплив добавки золи на міцність у ряді робіт [76, 85] характеризується “цементуючою ефективністю” – економією цементу, яка досягається при введенні у розчин 1кг золи при постійному В/Ц.

Для золо-цементних систем запропонована [118] формула міцності на стиск, яка є модифікацією відомої формули Болемея-Скрамтаєва:

$$R_{ст} = AR_{ц} \left(\frac{Ц + K_{ц.е} Z}{B} \right), \quad (3.48)$$

де $K_{ц.е}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності.

Як впливає з отриманих даних, величина $K_{ц.е}$ буде суттєво залежати від прийнятого золо-цементного відношення, а при заданій витраті цементу – від витрати золи. Очевидно, як видно з рис. 3.41...3.44, позитивний вплив золи на міцність розчинів може бути суттєво зменшений чи зведений до нуля при неоптимальному цементно-зольному відношенні і витраті золи.

Вплив добавок – поліфункціональних модифікаторів (ПФМ) на міцність розчинів залежить від їх складу та вмісту. При постійній рухомості збільшення вмісту суперпластифікатора

СП-3 у складі ПФМ закономірно приводить до збільшення міцності. Зокрема, при збільшенні вмісту СП-3 від 0,3 до 0,7% міцність розчину на стиск зростає на 23...34%, на згин – на 18...24% за інших рівних умов. Збільшення вмісту водоутримуючої і, особливо, повітрятягувальної добавки приводить до зниження міцності на 10...14% у першому та на 14...21% у другому випадку. Найбільш помітне зниження міцності спостерігається при вмісті добавки Tylose понад 0,3%, а добавки Міх-ДН – понад 0,04% від маси цементу. Однак при оцінці впливу цих добавок варто врахувати той факт, що при укладанні на пористі основи негативний вплив цих добавок на міцність модифікованих розчинів нівелюється підвищеною легкоукладальністю розчинових сумішей та високою якістю розчинового шва.

Модифікування розчинів добавками ПФМ позитивно позначається на співвідношенні міцностей на згин і стиск ($R_{зг}/R_{ст}$), яке є одним з критеріїв тріщиностійкості розчинів. На рис.3.45 наведені дані, які ілюструють зміну співвідношення $R_{зг}/R_{ст}$ у віці до 180 діб для розчинів, модифікованих ПФМ.

Збільшення співвідношення $R_{зг}/R_{ст}$ характерне для модифікованих розчинів як у віці 28 діб, так і в інші строки твердіння.

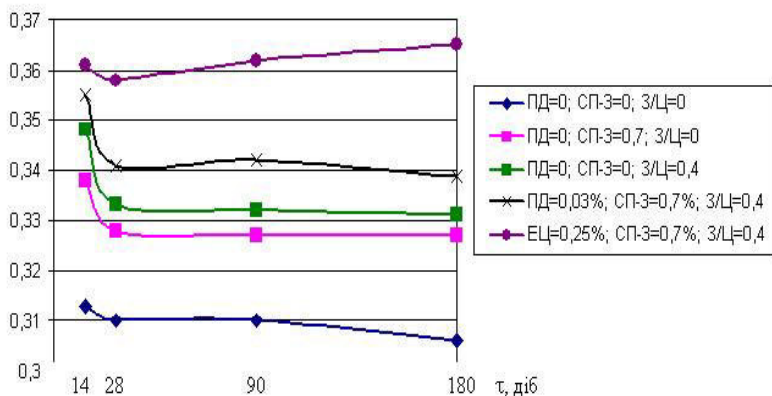


Рис. 3.45. Залежність критерія тріщиностійкості ($R_{зг}/R_{ст}$) від строку твердіння розчину, модифікованого ПФМ₁ та ПФМ₂ (В/Ц=0,7)

Вплив дисперсних кремнеземистих наповнювачів на міцність розчинів. Вплив дисперсних кремнеземистих компонентів у складі ПФМ на міцність цементно-зольних розчинів досліджували в залежності від факторів, які представлені співвідношеннями:

$$\begin{aligned} X_1 &= V_{\text{кд}} / (V_{\text{кд}} + V_3); \\ X_2 &= (V_{\text{кд}} + V_3) / (V_{\text{кд}} + V_3 + V_{\text{ц}}); \\ X_3 &= (V_{\text{кд}} + V_3 + V_{\text{ц}}) / (V_{\text{кд}} + V_3 + V_{\text{ц}} + V_{\text{в}}); \\ X_4 &= (V_{\text{кд}} + V_3 + V_{\text{ц}} + V_{\text{в}}) / (V_{\text{кд}} + V_3 + V_{\text{ц}} + V_{\text{в}} + V_{\text{п}}); \\ X_5 &= \text{СП} + \text{РПП}, \end{aligned} \quad (3.49)$$

де $V_{\text{кд}}$, V_3 , $V_{\text{ц}}$, $V_{\text{в}}$, $V_{\text{п}}$ – відповідно об'єми кремнеземистої добавки (КД) – мікрокремнезему (МК) чи домеленої золи (ЗД), золи-виносу, цементу, води, піску, які витрачаються на виготовлення розчинової суміші;

СП та РПП – вміст у суміші суперпластифікатора та редиспергованого полімерного порошку, % маси цементу. Співвідношення СП : РПП = 1 : 2 за масою.

Ці співвідношення всебічно характеризують структуру модифікованих розчинів.

Вплив вказаних факторів на міцність розчинів досліджували за допомогою типового плану Na_5 відповідно до умов планування, наведених у табл. 3.28. В результаті обробки експериментальних результатів отримані поліноміальні математичні моделі у кодованих змінних міцності на стиск та згин у віці 28 діб розчинів, які тверділи у нормальних умовах (табл. 3.29). Моделі міцності дозволяють проаналізувати вплив досліджуваних факторів, виконати інтерполяційні та оптимізаційні розрахунки, а також проектувати склади розчинових сумішей.

Найбільший вплив на міцність фактора X_3 (рис. 3.46...3.49) можна пояснити тим, що він характеризує вплив щільності зв'язуючої матриці і, відповідно, відношення в'язуче : вода. Суттєвий вплив на міцність при стиску мають також фактори X_2 та X_1 , які характеризують відповідно вміст активних мінеральних добавок (активних наповнювачів) у в'язучому та

високодисперсних кремнеземистих компонентів у складі мінеральних добавок.

Таблиця 3.28

Умови планування експериментів

Фактори	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
X ₁	0	0,25	0,5	0,25
X ₂	0,25	0,40	0,55	0,15
X ₃	0,40	0,50	0,60	0,10
X ₄	0,25	0,265	0,28	0,015
X ₅	0	1,5	3	1,5

Таблиця 3.29

Математичні моделі міцності модифікованих розчинів

Вид ПФМ	Рівняння регресії
МК+ СП+ РПП	$R_{CT} = 26,5 + 2,34x_1 + 2,63x_2 + 5,44x_3 + 1,86x_4 + 0,97x_5 - 0,948x_1^2 - 1,85x_2^2 - 0,98x_3^2 - 0,24x_4^2 - 0,15x_5^2 - 0,29x_1x_2 + 1,26x_1x_5 + 0,38x_2x_4 + 0,64x_2x_5 + 0,41x_3x_5 \quad (3.50)$ $R_{CT} = 4,19 + 0,18x_1 + 0,44x_2 + 0,86x_3 + 0,14x_4 + 0,33x_5 - 0,13x_1^2 - 0,57x_2^2 - 0,27x_3^2 - 0,09x_4^2 + 0,13x_4 + 0,63x_1x_5 - 0,038x_1x_3 + 0,15x_2x_5 + 0,09x_3x_5 \quad (3.51)$
ЗД+ СП+ РПП	$R_{CT} = 23,9 + 2,13x_1 + 2,37x_2 + 5,13x_3 + 1,83x_4 + 0,93x_5 - 0,647x_1^2 - 1,733x_2^2 - 0,98x_3^2 - 0,21x_4^2 - 0,14x_5^2 + 0,19x_1x_2 + 1,11x_1x_5 + 0,33x_2x_4 + 0,57x_2x_5 + 0,41x_3x_5 \quad (3.52)$ $R_{CT} = 3,81 + 0,15x_1 + 0,41x_2 + 0,86x_3 + 0,13x_4 + 0,33x_5 - 0,13x_1^2 - 0,43x_2^2 - 0,23x_3^2 - 0,09x_4^2 + 0,13x_4 + 0,53x_1x_5 - 0,033x_1x_3 + 0,23x_2x_5 + 0,09x_3x_5 \quad (3.53)$

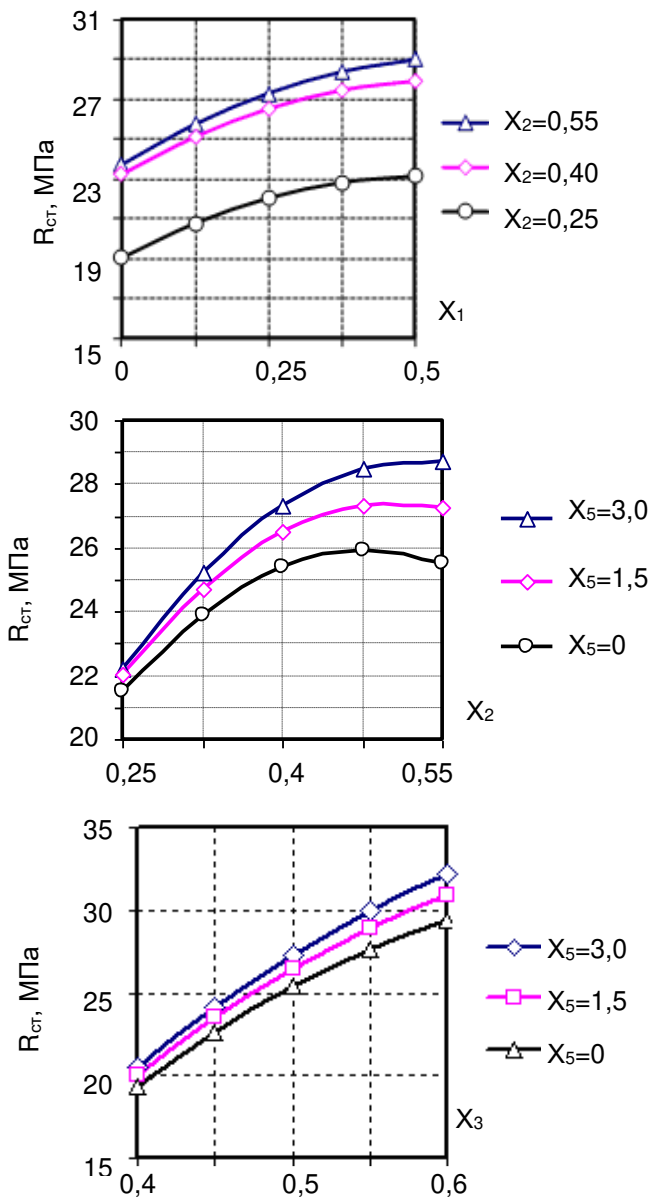


Рис. 3.46. Залежність міцності розчинів, які містять МК, на стиск від факторів складу

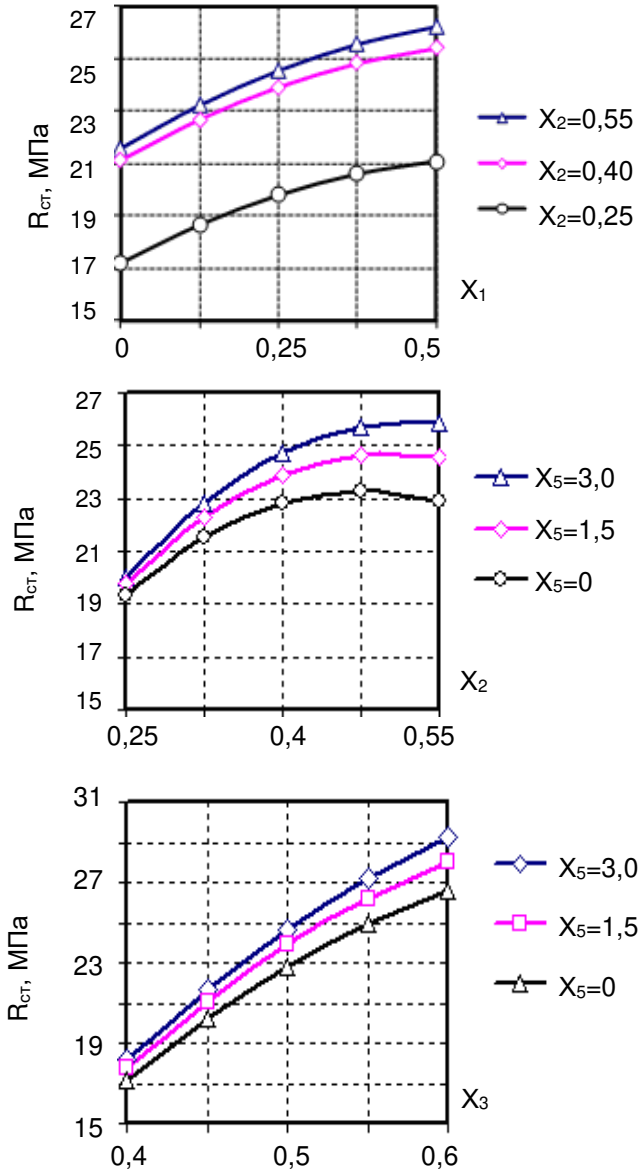


Рис. 3.47. Залежність міцності розчинів, які містять ЗД, на стиск від факторів складу

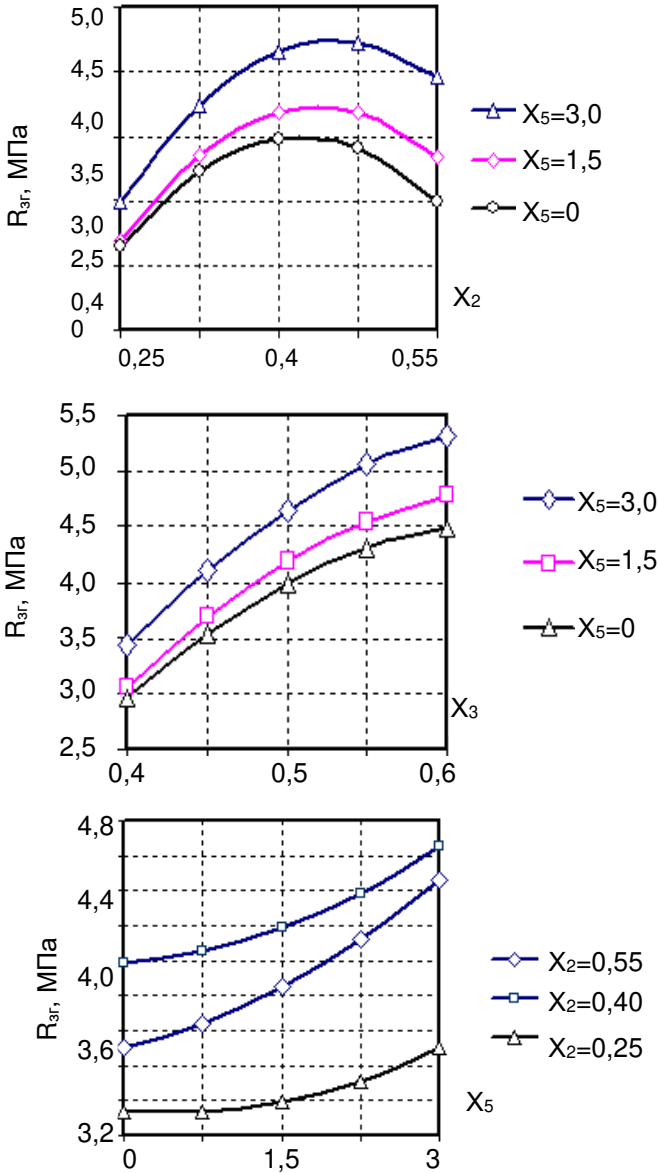


Рис. 3.48. Залежність міцності розчинів, які містять МК, на згин від факторів складу

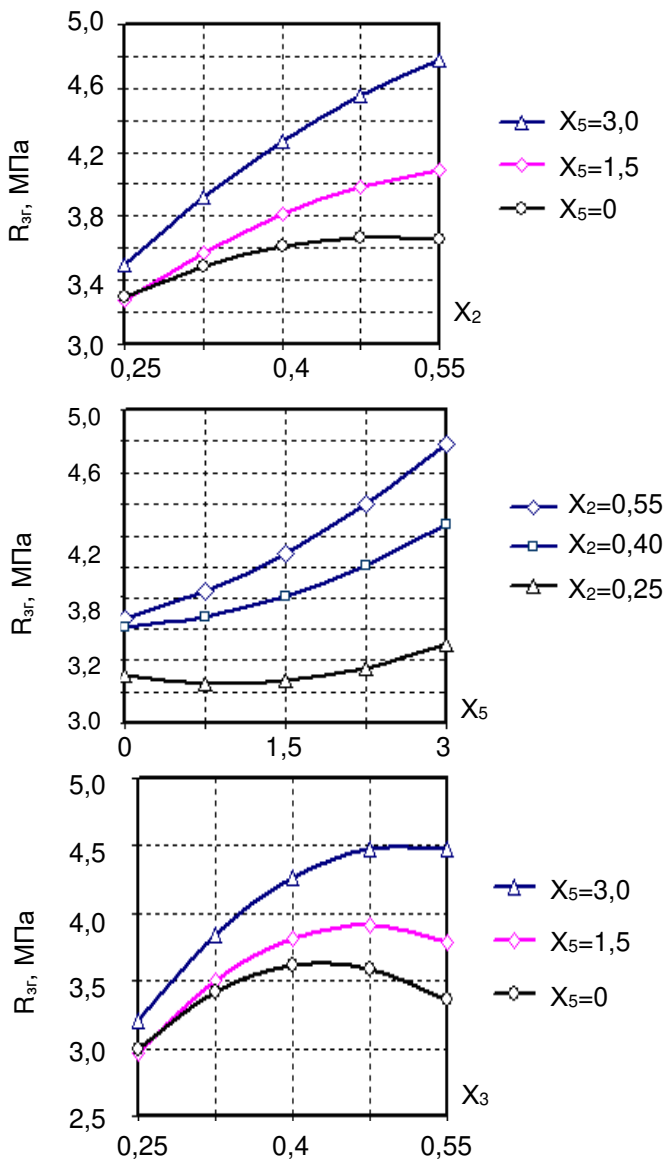


Рис. 3.49. Залежність міцності розчинів, які містять ЗД, на згин від факторів складу

Позитивний вплив активних мінеральних добавок на міцність розчину в умовах постійного водовмісту і, особливо, високодисперсних компонентів, які входять до складу ПФМ, обумовлений збільшенням ступеня гідратації та інтенсифікації процесів структуроутворення [129], Звертає на себе увагу також наявність помітних взаємодій ефектів впливу різних факторів на міцність і, особливо, факторів, визначаючих вміст основних компонентів та добавок. Як видно з наведених на рис. 3.50, 3.51 номограм, досягнення певних значень міцнісних показників розчинів можливе при різних співвідношенні факторів, які характеризують вміст основних компонентів та модифікаторів.

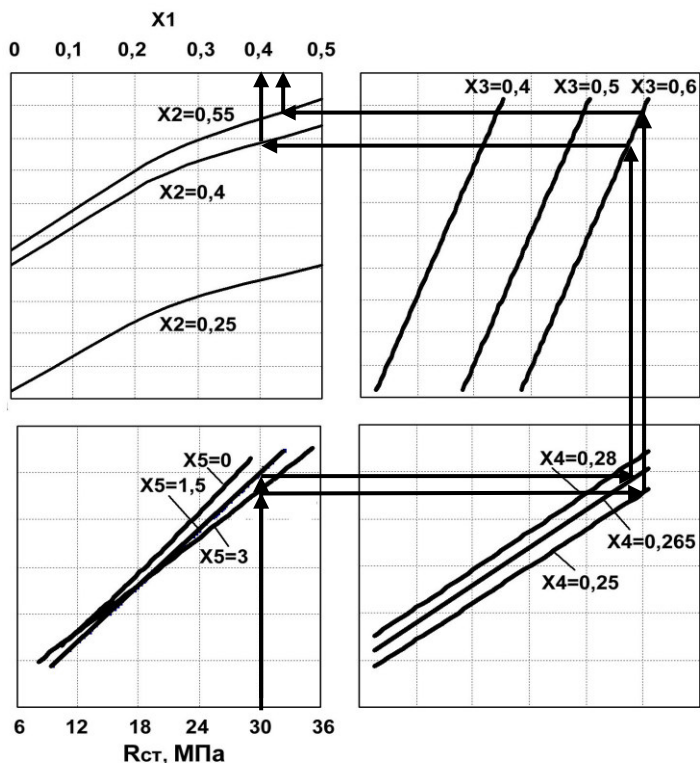


Рис. 3.50. Номограма міцності на стиск розчинів з ПФМ, що містять домелену золу

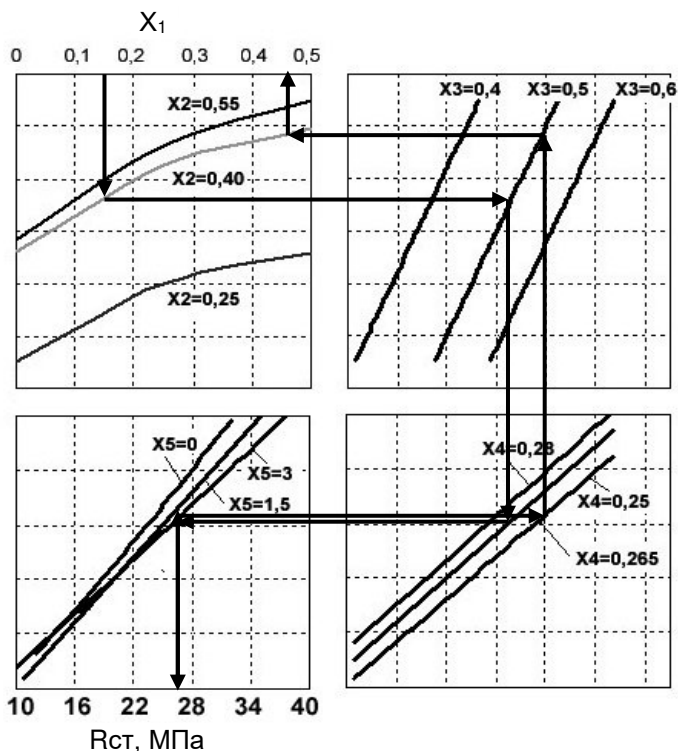


Рис. 3.51. Номограма міцності на стиск розчинів з ПФМ, який містить мікрокремнезем

Позитивно оцінюючи вплив на міцність розчинів добавок МК та ЗД, слід однак враховувати деяке підвищення водопотреби розчинових сумішей, які містять високодисперсні компоненти. Втім, таке підвищення значною мірою нівелюється при введенні до складу ПФМ суперпластифікатора. При цьому спільне введення СП та високодисперсних кремнеземистих компонентів позитивно позначається на міцності розчину навіть при незмінному водовмісті, що можна пояснити створенням кращих умов для ущільнення та взаємодії між частинками.

При постійній витраті води концентрація органічних компонентів ПФМ – суперпластифікатора та редиспергованого полімера, порівняно слабо впливає на міцність при стиску і в той

же час суттєво впливає на міцність при згині. Даний висновок пояснюється перш за все впливом полімерної добавки.

Склади розчинів поряд з їх умовами твердіння повинні визначати і кінетику зміни їх міцнісних показників у часі. Для оцінки впливу складу та вмісту ПФМ на зміну міцності розчинів у часі виконані спеціальні досліді. Зразки-куби з ребром 7,07 см тверділи у нормальних умовах. За результатами випробувань розраховували коефіцієнти зростання міцності у часі, наведені у табл. 3.30.

Таблиця 3.30

Коефіцієнти зростання міцності розчинів у часі

№ з/п	Склад розчину						Коефіцієнти зростання міцності $K_{\tau} = R_{\tau} / R_{28}$ у віці			
	В/Ц	З/Ц	B, кг/м ³	МК/З	ЗД/З	РПП, %	7 діб	28 діб	60 діб	90 діб
1	0,8	-	250	-	-	-	0,60	1	1,13	1,24
2	0,75	0,4	270	-	-	-	0,62	1	1,14	1,24
3	0,82	0,4	277	0,15	-	-	0,64	1	1,18	1,23
4	0,85	0,4	281	0,3	-	-	0,69	1	1,16	1,27
5	0,81	0,4	275	-	0,15	-	0,63	1	1,15	1,25
6	0,83	0,4	278	-	0,3	-	0,67	1	1,18	1,26
7	0,83	0,4	279	0,3	-	0,5	0,71	1	1,17	1,26
8	0,82	0,4	277	0,3	-	3	0,72	1	1,18	1,25
9	0,80	0,4	273	-	0,3	0,5	0,66	1	1,15	1,24
10	0,79	0,4	271	-	0,3	3	0,69	1	1,17	1,27

Примітки: 1. У всі склади вводили СП у кількості 0,7% від маси цементу. 2. Співвідношення пісок : цемент прийняте рівним 3 : 1 за масою.

Як впливає з отриманих експериментальних даних, коефіцієнти росту міцності модифікованих розчинів $K_{\tau} = R_{\tau} / R_{28}$ мають вищі значення у 7-добовому віці. У більш пізні строки твердіння вони практично вирівнюються.

Для оцінки порівняльної тріщиностійкості розчинів може бути використаний критерій K , який характеризує відношення міцносних показників на згин та стиск ($R_{зг} / R_{ст}$). Він значним чином відображає дефектність та деформативність структури затверділого розчину [118].

Для аналізу впливу факторів складу модифікованих розчинів на вказаний критерій за отриманими експериментальними значеннями міцності розраховані поліноміальні моделі відношення $R_{зг} / R_{ст}$ у кодованих змінних, наведені нижче.

Для розчинів з добавкою МК у складі ПФМ:

$$R_{зг} / R_{ст} = 0,159 + 0,009x_1 - 0,002x_2 + 0,002x_3 - 0,005x_4 + 0,013x_5 + 0,001x_1^2 - 0,015x_2^2 - 0,004x_3^2 + 0,003x_4^2 + 0,006x_5^2 - 0,002x_1x_2 - 0,007x_1x_3 + 0,021x_1x_5 - 0,007x_2x_4. \quad (3.54)$$

Для розчинів з добавкою ЗД у складі ПФМ:

$$R_{зг} / R_{ст} = 0,157 + 0,011x_1 - 0,002x_2 - 0,009x_4 + 0,011x_5 - 0,004x_1^2 - 0,005x_2^2 - 0,004x_3^2 + 0,003x_4^2 + 0,004x_5^2 + 0,003x_1x_2 + 0,006x_1x_3 - 0,014x_1x_5 - 0,005x_3x_5 - 0,015x_4x_5. \quad (3.55)$$

Графічний аналіз моделей наведений на рис. 3.52, 3.53. Він показує, що із підвищенням ступеня модифікування розчинів – збільшення вмісту високодисперсної (фактор X_1), та органічної (фактор X_5) добавок, а також збільшення золоцементного відношення до 0,4...0,5 величина $R_{зг} / R_{ст}$ збільшується.

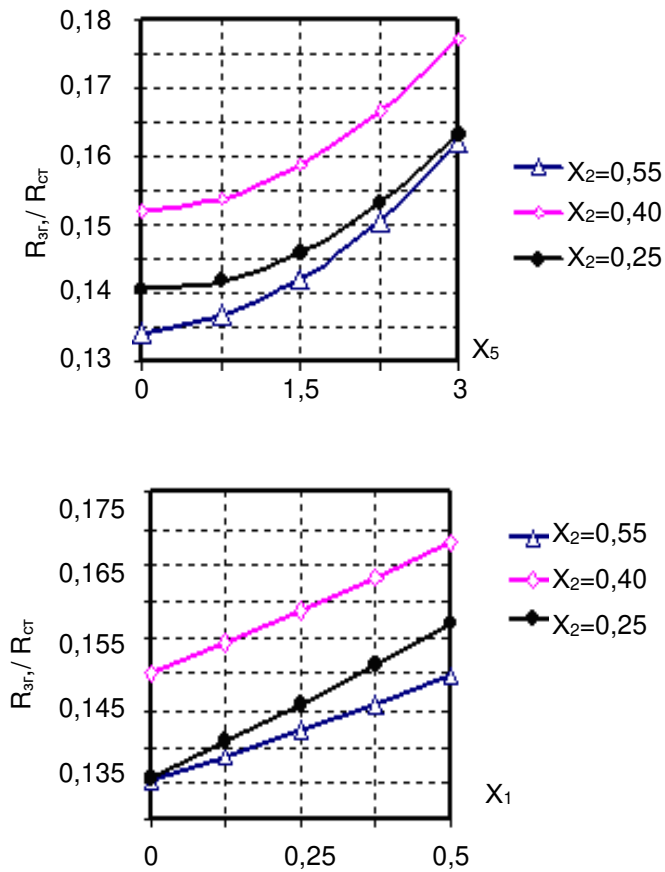


Рис. 3.52. Залежність критерія тріщиностійкості $K = R_{3r} / R_{cr}$ для розчинів, які містять МК, від вмісту компонентів ПФМ

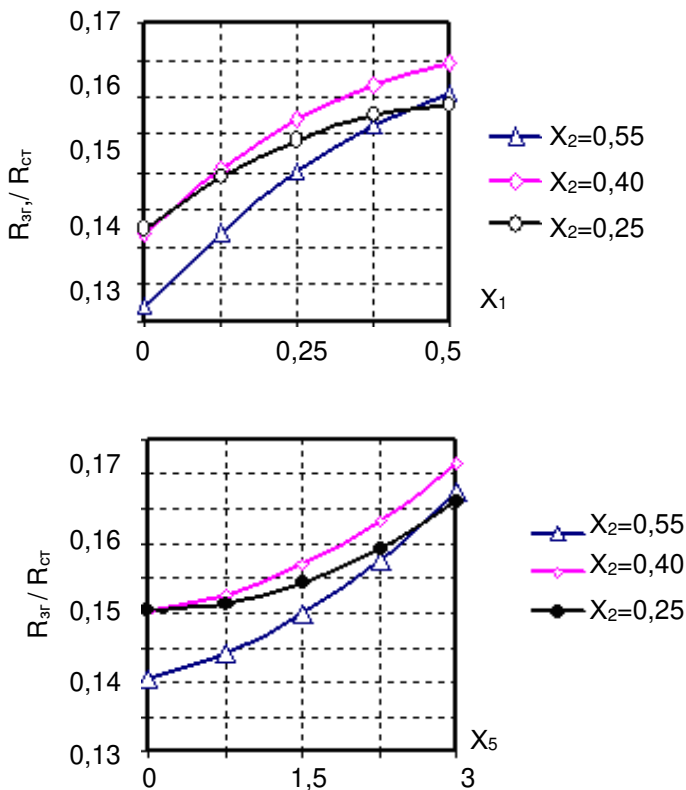


Рис. 3.55. Залежність критерія тріщиностійкості $K=R_{3r} / R_{cr}$ для розчинів, які містять ЗД, від вмісту компонентів ПФМ

На типових складах також вивчали зміну критерія тріщиностійкості в часі. В табл. 3.31 наведені отримані експериментальні значення.

Для всіх досліджених складів, як випливає з даних табл. 3.31 характерне зменшення критерія K в часі. Як відомо [118, 105, 130], ця закономірність характерна для всіх цементних бетонів і розчинів. Однак темп зниження вказаного критерія в часі для розчинів, модифікованих добавками ПФМ суттєво менший, особливо при збільшенні вмісту РПП та мікрокремнеземистої добавки.

Таблиця 3.31

Зміна критерія тріщиностійкості розчинів у часі

№ з/п	Склад розчину						Критерій тріщиностійкості $K=R_{зг} / R_{ст}$ у віці		
	В/Ц	З/Ц	В, кг/м ³	МК/З	ЗД/З	РПП	28 діб	60 діб	90 діб
1	0,8	–	250	–	–	–	0,140	0,136	0,132
2	0,75	0,4	270	–	–	–	0,143	0,139	0,135
3	0,82	0,4	277	0,15	–	–	0,145	0,142	0,139
4	0,85	0,4	281	0,3	–	–	0,149	0,147	0,145
5	0,81	0,4	275	–	0,15	–	0,147	0,145	0,142
6	0,83	0,4	278	–	0,3	–	0,150	0,147	0,144
7	0,83	0,4	279	0,3	-	0,5	0,155	0,152	0,150
8	0,82	0,4	277	0,3	-	3	0,175	0,173	0,173
9	0,80	0,4	273	–	0,3	0,5	0,160	0,157	0,156
10	0,79	0,4	271	–	0,3	3	0,164	0,162	0,161

3.8. Деформативні властивості розчинів з модифікуючими добавками

Деформативні властивості розчинів так як і бетонів значною мірою визначаються модулем пружності. Модуль пружності розчину E_p , так як і бетону, можна прогнозувати, базуючись на теоретичній залежності, отриманій при розгляді розчину як двофазної системи зі сферичними частками заповнювача, рівномірно розподіленими в цементному камені [131]:

$$E_p = \frac{V_k + (2 - V_k)E_3/E_k}{2 - V_k + V_kE_3/E_k}; \quad (3.56)$$

де V_k – об'ємна концентрація цементного каменю;

E_3 і E_k – модуль пружності заповнювача і цементного каменю.

На модуль пружності цементного каменю вирішальний вплив відіграє його пористість V_n і пружність т.з. “гелево-кристалічної фази”, що впливає із відомого [84] виразу:

$$n_n = (1 - V_n)^3 n_{n.n}. \quad (3.57)$$

де: V_n – об’єм піску;

$n_{n.n}$ – модуль пружності гелево-кристалічної фази.

Наявні літературні дані про вплив ПАР суперечливі, хоча більшість дослідників [84] вважає, що введення добавок знижує модуль пружності бетону. Зниження модуля пружності з добавками ПАР пояснюється за рахунок адсорбційного модифікування структури цементного каменю або, за А.В. Саталкіним, виникненням у гідратованих оболонках зерен більшої кількості структурних елементів, що приводить до збільшення поверхні ковзання часток. При введенні пластифікуючих добавок варто враховувати поряд з модифікуванням структури вплив двох можливих протилежних по дії ефектів - зменшення пористості цементного каменю і зменшення об’єму цементного каменю в бетоні.

В.Г. Батраков проаналізував [117] ряд експериментальних результатів про вплив добавки суперпластифікатора С-3 на модуль пружності і прийшов до висновку, що для литих бетонів введення добавки суперпластифікатора при незначному підвищенні міцності приводить до маловідчутного зменшення модуля пружності. При використанні суперпластифікатора для зменшення В/Ц і збільшення міцності, модуль пружності бетону може істотно зростати.

Полімерні добавки також можуть приводити до деякого підвищення модуля пружності. За даними, наприклад, І. Охама [132] при полімерцементному відношенні 0,05 добавка полівінілацетатної дисперсії збільшила модуль пружності бетону з $2,11 \times 10^4$ МПа до $2,27 \times 10^4$ МПа.

Визначення модуля пружності розчинів з добавками-модифікаторами виконували дослідним шляхом у віці 28 діб на призмах розміром $70 \times 70 \times 280$ мм. Деформації вимірювали за

допомогою тензодатчиків з точністю $0,7 \times 10^{-5}$. Навантаження призм створювали в пружинних установках ступенями по $0,05R_{\text{пр}}$ із витримкою 5 хв. до рівня $0,3 R_{\text{пр}}$ ($R_{\text{пр}}$ – призмova міцність розчину). Значення модуля пружності обчислювали за формулою:

$$E_p = \sigma / \varepsilon_p, \quad (3.58)$$

де σ – прикладене напруження;
 ε_p – повздовжні відносні деформації.

Значення міцності і модуля пружності досліджених розчинів наведені в табл. 3.32 і 3.33. Співвідношення цемент:пісок прийнято з умови досягнення розчином рухомості, що відповідає зануренню конуса 7...9 см.

Аналіз даних табл. 3.32 показує, що призмova міцність досліджених розчинів лежить в межах 0,81...0,88 від $R_{\text{ст}}$ і її можна орієнтовно знайти з рівняння:

$$R_{\text{пр}} = 0,85R_{\text{ст}}. \quad (3.59)$$

Як відомо, для важких бетонів справедлива кореляційна залежність $R_{\text{пр}} = 0,783R_6$ [133]. Більш високі співвідношення призмовой і кубикової міцності зафіксовані для розчинів та піщаних бетонів і іншими авторами [134].

При прогнозуванні модуля пружності важкого бетону при навантаженні його у віці τ найчастіше застосовуються [118] залежності типу:

$$E_6 = \frac{E_m R_\tau}{S + R_\tau}, \quad (3.60)$$

де R_τ – кубикова міцність бетону на стиск;

E_m і S – емпіричні константи. У будівельних нормах рекомендуються значення $E_m = 52000$; $S = 23$.

Таблиця 3.32

Вплив поліфункціональних модифікаторів (ПФМ)
на міцність та модуль пружності розчинів

№ з/п	Водоцементне відношення	Зоолоцементне відношення	Вміст ПД або ЕЦ, % маси в'язучого	Вміст СП-3, % маси в'язучого	Міцність на стиск, МПа, у віці 28 діб		Модуль пружності $E_p \times 10^4$ МПа
					кубикова	призмова	
Цементно-зольний розчин з ПФМ ₁ (СП-3+ПД)							
1	0,6	-	-	-	26,9	22,7	2,11
2	0,6	-	-	0,7	28,7	24,2	2,26
3	0,6	0,4	-	-	31,3	27,2	2,45
4	0,6	0,4	0,03	0,7	29,8	25,0	2,33
5	0,7	-	-	-	24,9	20,1	2,11
6	0,7	-	-	0,7	26,2	22,2	2,16
7	0,7	0,4	-	-	27,8	24,7	2,28
8	0,7	0,4	0,03	0,7	25,7	22,2	2,04
9	0,8	-	-	-	23,0	19,4	2,00
10	0,8	-	-	0,7	25,6	21,7	2,07
11	0,8	0,4	-	-	26,4	22,6	2,21
12	0,8	0,4	0,03	0,7	24,9	21,2	2,03
Цементно-зольний розчин з ПФМ ₂ (СП-3+ЕЦ)							
13	0,6	0,4	0,25	0,7	32,9	28,0	7,3
14	0,7	0,4	0,25	0,7	30,6	26,2	8,0
15	0,8	0,4	0,25	0,7	28,5	24,0	8,5

Аналіз експериментальних значень модуля пружності розчинів (табл. 3.33) показує, що вони орієнтовно на 20% нижче розрахованих по формулі (3.60).

Комплексною оцінкою деформативності бетонів та їх тріщиностійкості є відношення границі міцності при розтягу чи при згині до статичного чи динамічного модуля пружності [137, 119]. Ці параметри досить близькі.

Таблиця 3.33

Динамічний модуль пружності та умовна розтяжність
клеювих розчинів

№ з/п	Склад розчину						E _{дин} x10 ⁻⁴ , МПа, через діб			ε _y x 10 ⁻⁴ , через діб		
	В/Ц	З/Ц	В, кг/м ³	МК/З	ЗД/З	РПП	28	90	180	28	90	180
	0,8	–	250	–	–	–	3,63	3,98	4,17	1,13	1,12	1,10
2	0,75	0,4	270	–	–	–	3,25	3,77	3,96	1,08	1,10	1,10
3	0,82	0,4	277	0,15	–	–	3,83	4,44	4,58	1,22	1,28	1,30
4	0,85	0,4	281	0,3	–	–	3,90	4,45	4,56	1,24	1,30	1,33
5	0,81	0,4	275	–	0,15	–	3,62	4,02	4,23	1,12	1,13	1,15
6	0,83	0,4	278	–	0,3	–	3,57	3,92	4,14	1,19	1,22	1,24
7	0,83	0,4	279	0,3	–	0,5	3,95	4,47	4,56	1,30	1,35	1,39
8	0,82	0,4	277	0,3	–	3	4,05	4,61	4,69	1,37	1,42	1,46
9	0,80	0,4	273	–	0,3	0,5	3,65	3,97	4,24	1,22	1,26	1,30
10	0,79	0,4	271	–	0,3	3	3,75	3,99	4,15	1,26	1,31	1,35

Порівняння експериментальних значень статичного і динамічного модулів пружності показує, що співвідношення $E_{ст}/E_{дин}$ для бетонів і розчинів знаходиться в інтервалі 0.87...0.95. При цьому менші значення характерні для матеріалів з границею міцності при стиску меншою 25 МПа [118].

Відношення міцності бетонів на розтяг при згині ($R_{p,зг}$) до величини динамічного модуля пружності ($E_{дин}$) характеризує так звану умовну деформативність (ϵ_y). Показано, що:

$$\epsilon_y = \frac{R_{p,зг}}{E_{дин}} \approx \frac{0,57R_{p,зг}}{0,99 \cdot 1,1E_{ст}} \approx 0,52 \frac{R_{p,зг}}{E_{ст}}. \quad (3.61)$$

У табл. 3.33 та 3.34 наведені значення параметра ε_y для досліджених розчинів у віці 28 діб, розраховані за формулою (3.61).

Таблиця 3.34

Умовна розтяжність модифікованих мурувальних розчинів

№ з/п	Водоцементне відношення	Золоцементне відношення	Вміст ПД або ЕЦ, % маси в'язучого	Вміст СП-3, % маси в'язучого	Міцність на розтяг при згині $R_{р.зг}$, МПа	$\frac{R_{р.з}}{R_{ст}}$	Модуль пружності $E_p \times 10^4$ МПа	Умовна розтяжність, $\varepsilon_y \times 10^{-4}$
Цементно-зольний розчин з ПФМ ₁ (СП-3+ПД)								
1	0,6	-	-	-	8,34	0,31	2,11	2,06
2	0,6	-	-	0,7	9,76	0,34	2,26	2,25
3	0,6	0,4	-	-	10,02	0,32	2,45	2,13
4	0,6	0,4	0,03	0,7	9,83	0,33	2,33	2,19
5	0,7	-	-	-	7,72	0,31	2,11	1,90
6	0,7	-	-	0,7	8,65	0,33	2,16	2,08
7	0,7	0,4	-	-	9,17	0,33	2,28	2,09
8	0,7	0,4	0,03	0,7	8,74	0,34	2,04	2,23
9	0,8	-	-	-	7,36	0,32	2,00	1,91
10	0,8	-	-	0,7	8,70	0,34	2,07	2,19
11	0,8	0,4	-	-	8,71	0,33	2,21	2,05
12	0,8	0,4	0,03	0,7	8,96	0,36	2,03	2,30
Цементно-зольний розчин з ПФМ ₂ (СП-3+ЕЦ)								
13	0,6	0,4	0,25	0,7	11,84	0,36	2,57	2,40
14	0,7	0,4	0,25	0,7	11,02	0,36	2,44	2,35
15	0,8	0,4	0,25	0,7	9,98	0,35	2,34	2,22

Умовна розтяжність немодифікованих розчинів зі збільшенням тривалості твердіння, має тенденцію до зниження, у той час, як для модифікованих вона зростає. Очевидно, знак зміни умовної розтяжності розчину i , відповідно, тріщиностійкості в міру збільшення віку пов'язаний з характером зміни співвідношення міцності при розтягу (R_p) і міцності при стиску ($R_{ст}$). Для розчинів з добавками ПФМ це співвідношення вище, ніж для немодифікованих розчинів як у 28 діб, так і в наступний термін твердіння. Більш високе відношення міцності на розтяг до міцності на стиск для бетонів і розчинів з активними мінеральними добавками відзначається і у роботах інших дослідників [136].

Усадку зразків-призм розчинів розмірами $40 \times 40 \times 160$ мм розчинів з добавками ПФМ заміряли за допомогою штативного приладу, оснащеного індикатором годинникового типу (мессурою) з ціною поділки $0,001$ мм. Репери в торцеві грані призм встановлювали через 8 год. після ущільнення їх у формах. Зразки зберігали при температурі $20 \pm 2^\circ \text{C}$ і відносній вологості $75 \pm 5\%$. Криві усадочних деформацій наведені на рис. 3.54.

Аналіз їх показує, що для всіх досліджуваних складів усадочні деформації стабілізуються до віку 100 діб. Найвищі значення усадки мають розчини без добавок ПФМ. Їхня усадка до моменту затухання коливається в діапазоні $0,7 \dots 1,5$ мм/м, характерному для дрібнозернистих бетонів при аналогічних В/Ц [134]. У ранні строки твердіння добавка золи-виносу збільшує усадочні деформації, які потім вирівнюються з деформаціями розчинів без золи. Добавка ПФМ₂ зменшує граничні усадочні деформації на $20 \dots 35\%$, добавка ПФМ₁ – на $30 \dots 50\%$. Ступінь зменшення усадочних деформацій зростає по мірі збільшення пластифікуючого ефекту ПФМ. Найбільш суттєве зменшення усадки спостерігається при введенні повітрявтягувальної добавки – на $40 \dots 60\%$.

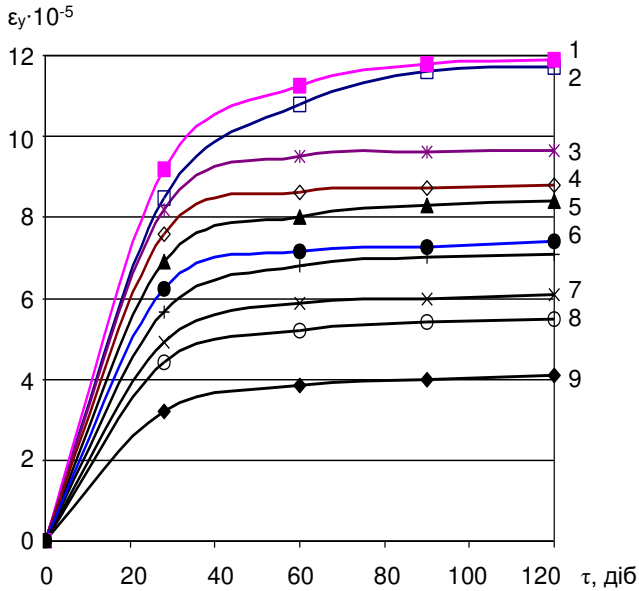


Рис. 3.54. Усадочні деформації модифікованих цементно-зольних розчинів:

1-5, 8 – В/Ц=0,8:

1 – розчин без ПФМ, З/Ц=0,4;

2 – розчин без ПФМ, З/Ц=0;

3 – З/Ц=0,4, СП-3=0,7%, ЕЦ=0,1%;

4 – З/Ц=0,4, СП-3=0,7%, ЕЦ=0,4%;

5 – З/Ц=0,4, СП-3=0,7%, ПД=0,01%;

8 – З/Ц=0,4, СП-3=0,7%, ПД=0,05%;

6, 7, 9, 10 – В/Ц=0,6:

6 – розчин без ПФМ, З/Ц=0,4;

7 – розчин без ПФМ, З/Ц=0;

9 – З/Ц=0,4, СП-3=0,7%, ЕЦ=0,4%;

10 – З/Ц=0,4, СП-3=0,7%, ПД=0,04%

3.9. Водонепроникність, корозійна та морозостійкість розчинів з добавками ПФМ

Для забезпечення надійності експлуатації розчинів з добавками ПФМ важливе значення має їх корозійна стійкість, особливо стійкість до м'яких мінералізованих вод, а також атмосферостійкість.

Підвищена стійкість бетонів і розчинів з активними мінеральними добавками в м'яких і мінералізованих водах добре відома [86, 118]. Вона обумовлена зв'язуванням вільного гідроксиду кальцію, який виділяється при гідролізі C_3S активним кремнеземом, зниженням основності гідросилікатів і зменшенням кількості утвореного еtringіту, утворенням більш щільного цементного каменю.

Велика кількість експериментів на різних цементах і золах [76] показала, що зола будь-якого типу істотно підвищує сульфатостійкість бетону пропорційно її добавці до використаного цементу.

Значною мірою характеризує капілярне всмоктування, водонепроникність та корозійну стійкість водопоглинання розчинів. Вплив добавок-модифікаторів та зола-цементного відношення на водопоглинання вивчали на зразках – призмах $40 \times 40 \times 160$ мм у віці 28 діб. Результати дослідів наведені на рис. 3.55. Вони показують, що для всіх досліджених розчинів збільшення З/Ц до 0,4 не приводить до суттєвого збільшення водопоглинання, при подальшому підвищенні З/Ц водопоглинання помітно зростає. При цьому із збільшенням пластифікуючого ефекту ПФМ інтенсивність зростання водопоглинання при $Z/C > 0,6$ стає меншим, несприятливий вплив високих З/Ц загладжується.

Отримані дані досить добре узгоджуються зі зміною водопотреби бетонних сумішей залежно від зола-цементного відношення, що, очевидно, в кінцевому рахунку визначає обсяг відкритих, доступних для насичення водою пор розчину.

Зміна водопоглинання розчинів з добавками ПФМ корелює з міцністю на стиск, що, пояснюється близькою залежністю обох властивостей від відкритої пористості.

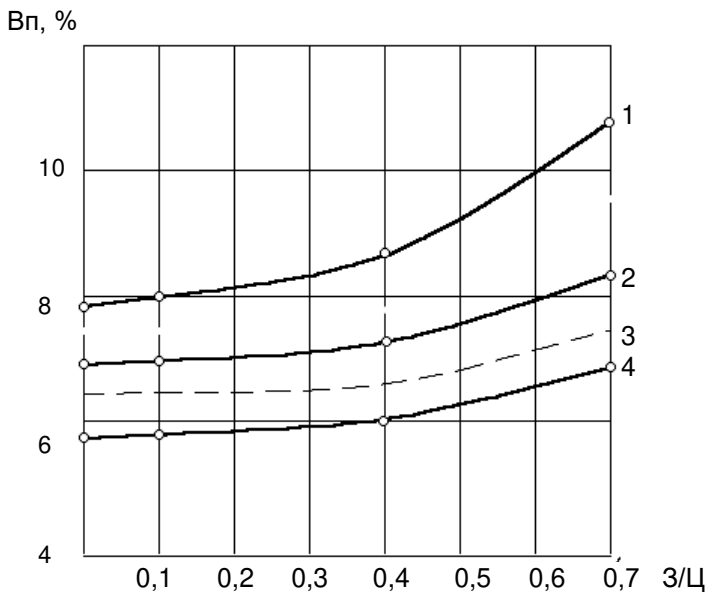


Рис. 3.55. Вплив золю-цементного відношення на водопоглинання розчинів ($V/C=0,6$):
 1 – розчин без добавок ПФМ;
 2 – ПФМ₂ (СП-3=0,7%; ЕЦ=0,25%);
 3 – ПФМ₁ (СП-3=0,7%; ПД=0,03%);
 4 – ПФМ₁ (СП-3=0,7%; ПД=0,05%)

Для забезпечення високої довговічності будівельних розчинів в кладці певне значення має їх стійкість до корозії вилугування та сульфатостійкість. Стійкість до вилугування важлива також для попередження утворення білого нальоту на кладці, сульфатостійкість розчинів забезпечує їх довговічність при агресивній дії навколишнього середовища з зони промислових підприємств та вихлопних газів автотранспорту.

Корозійна стійкість розчинів пов'язана як з особливостями складу цементів і наповнювачів, так і не меншим чином зі складом розчинових сумішей. Сумарний вплив як якісних особливостей компонентів розчинових сумішей, так і їхнього кількісного співвідношення на корозійну стійкість значною мірою проявляється на водопроникності розчину.

Водонепроникність розчинів визначали за методом "мокрої плями" на розчинових дисках відповідно до стандартних вимог. Результати вимірювань водонепроникності досліджених розчинів у часі наведені в табл. 3.35. Вони в цілому узгоджуються з наведеними раніше даними за водопоглинанням розчинів.

Як відомо, водонепроникність бетонів і розчинів особливо знижують пори седиментаційного характеру, які є шляхами фільтрації води. Седиментаційні процеси в розчиновій суміші і викликане ними водовідділення досить чутливі до вмісту дисперсного наповнювача.

Багатьма дослідженнями показано, що водонепроникність набагато більше, ніж міцність, підвищується з віком розчину за умови запобігання висушування при твердінні. Цей ефект "самоущільнення" пов'язаний із заповненням по мірі гідратації частини пор гелем, об'єм якого значно більший об'єму негідратованого цементу. За даними В.Б. Судакова [90] коефіцієнт підвищення водонепроникності бетонів у віці 90 і 360 діб на портландцементі дорівнює відповідно 2...3 і 3...4, на пуцолановому портландцементі 3...4 і 5...6. Для модифікованих розчинів, за нашими даними, ці коефіцієнти виявилися нижчі, хоча і досить значними (табл. 3.35).

Для оцінки сульфатостійкості наповнених розчинів визначали зміну міцності на розтяг при згині ($R_{зг}$) у 5%-вому розчині Na_2SO_4 .

Відповідно до відомої класифікації, середовище вважається сильноагресивним, якщо при експлуатації конструкцій у ньому протягом року зниження міцності досягає більше 20%, середньоагресивним – 5...20%, слабоагресивним – менше 5% і неагресивним – 0%. З даних, наведених у табл. 3.35, видно, що 5%-вий водний розчин Na_2SO_4 виявився сильноагресивним середовищем для розчину без наповнювача. Для розчинів, наповнених лише золою, воно виявилось слабоагресивним, а для модифікованих розчинів неагресивним. Для них відзначається не зниження міцності в 5%-вому розчині Na_2SO_4 , а навіть її зростання.

Ще більшою мірою, ніж золи, перспективними з позиції стійкості бетонів у мінералізованих водах є висококремнеземисті

добавки, у тому числі мікрокремнезем (МК). Наповнювачі, багаті активним кремнеземом, зменшують утворення гідроалюмінатів кальцію, зв'язуючи гідролітичне вапно, і знижують загальний зміст оксиду алюмінію в наповненому в'язучому.

Таблиця 3.35

Водонепроникність та сульфатостійкість
модифікованих розчинів

№ складу	Водоцементне відношення	Золоцементне відношення	Вміст ПД або ЕЦ, % маси в'язучого	Вміст СП-3, % маси в'язучого	Водонепроникність, МПа, через, діб			Міцність на згин в 5%-вому розчині Na_2SO_4 у віці 180 діб, % від початкової
					28	180	360	
Цементно-зольний розчин з ПФМ ₁ (СП-3+ПД)								
1	0,7	-	-	-	0,3(100%)	0,7(233%)	0,9(300%)	0,78
2	0,7	-	-	0,7	0,5(100%)	0,9(180%)	1,2(240%)	0,92
3	0,7	0,4	-	-	0,4(100%)	0,9(225%)	1,3(325%)	0,96
4	0,7	0,4	0,03	0,7	0,6(100%)	1,2(200%)	1,5(250%)	1,02
Цементно-зольний розчин з ПФМ ₂ (СП-3+ЕЦ)								
5	0,7	0,4	0,1	0,7	0,6(100%)	1,3(217%)	1,8(300%)	1,04
6	0,7	0,4	0,4	0,7	0,7(100%)	1,4(200%)	1,9(271%)	1,05

Найменший показник водонепроникності клейових розчинів характерний (табл. 3.36) для розчинів без добавок, а найбільший – для розчинів з максимальним вмістом ПФМ. Характерно, що заміна до 50% СП у складі ПФМ полімерною добавкою не зменшує водонепроникність розчинів. Повна заміна суперпластифікатора РПП може викликати незначне зменшення водонепроникності. Позитивний вплив добавки СП на водонепроникність досліджуваних розчинів закономірно

пояснюється її сильним пластифікуючим ефектом. Для добавки РПП, як показано раніше, величина пластифікуючого ефекту значно менша, однак вона може викликати кольматуючу дію за рахунок набрякання у воді [102, 137, 138]. При постійному вмісті і складі ПФМ, оптимальних значеннях золю-цементного відношення (табл. 3.36) спостерігається помітне підвищення водонепроникності, що узгоджується з відомими даними [52, 118]. Підвищення золю-цементного відношення понад 0,4 привело до зменшення як граничного тиску, який витримується зразками (з 1,1 до 0,9 МПа), так і показника непроникності, що можна пов'язати з деяким ростом водопотреби.

Таблиця 3.36

Водонепроникність модифікованих розчинів

№ складу	Склад розчину						Тиск Р, МПа	Глибина фільтрації, b, см	Показник непроникності, Р/б
	В/Ц	З/Ц	В, кг/м ³	МК/З	ЗД/З	РПП			
1	0,8	-	250	-	-	-	0,3	4,5	0,07
2	0,75	0,4	270	-	-	-	0,5	3,9	0,13
3	0,85	0,4	281	0,3	-	-	0,7	3,5	0,20
4	0,83	0,4	278	-	0,3	-	0,6	3,9	0,15
5	0,83	0,4	279	0,3	-	0,5	0,8	3,5	0,23
6	0,83	0,4	279	0,3	-	2,65	1,1	3,3	0,33
7	0,84	0,4	280	0,3	-	3	1,1	3,4	0,32
8	0,80	0,4	273	-	0,3	0,5	0,8	3,6	0,22
9	0,79	0,4	271	-	0,3	3	1,0	3,3	0,30
10	0,85	0,7	282	0,3	-	2,65	0,9	3,3	0,27
11	0,82	0,7	282	-	0,3	2,65	0,8	3,5	0,23

Примітки: 1. У всі склади, окрім 7 та 9 вводили СП у кількості 0,7% від маси цементу. У складах 7 та 9 вміст СП=0,35%. 2. Співвідношення пісок : цемент прийняте рівним 3 : 1 за масою.

З табл. 3.36 видно, що розчинові суміші, які містять ПФМ, можуть досягати досить високої водонепроникності.

Для оцінки стійкості розчинів досліджених складів до корозії вилугування визначали міцність зразків-балочок на згин при зберіганні їх у воді. Результати дослідів наведені на рис. 3.56.

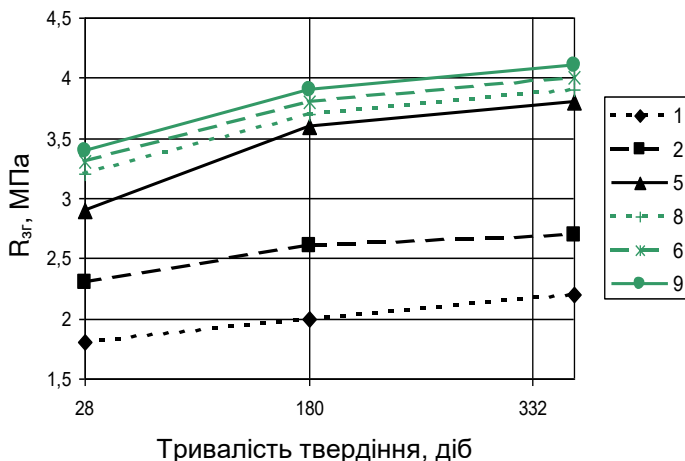


Рис. 3.56. Зміна міцності модифікованих розчинів на згин у часі при зберіганні зразків у воді (нумерація складів розчинів за табл. 3.36)

З них випливає, що для всіх складів характерний ріст міцності розчинів на згин у віці 28...360 діб. Приріст міцності до 180 доби у порівнянні з 28 добою складає 20...30%, до 360 доби – 40...50 %. Абсолютна величина міцності розчинів з ПФМ на згин при твердінні у воді в усі досліджені терміни твердіння залишається на 20...30% вищою, що дозволяє вважати їх достатньо стійкими до корозії вилугування.

Морозостійкість. Морозостійкість розчину як і бетону не меншою мірою ніж міцність визначається характером його порової структури. Капілярні макропори є основним дефектом будови ущільненого бетону, який знижує його морозостійкість. За даними Г.І. Горчакова [68] морозостійким виявляється бетон

із вмістом капілярних пір не більше 5...7 %. Ним запропоноване емпіричне рівняння, яке зв'язує морозостійкість F з капілярною пористістю Π_k степеневою залежністю:

$$F = (14 - \Pi_k)^{2.7}. \quad (3.62)$$

На морозостійкість істотний вплив чинять також розміри пор – знижують морозостійкість бетону пори з розміром більшим 10^{-5} см, заповнені в звичайних умовах водою.

Крім об'єму і розміру пор, найважливішим параметром, який визначає морозостійкість, є співвідношення об'ємів умовно-замкнених пор, утворених у результаті контракції і повітрявтягування, і відкритих пор, які насичуються замерзаючою водою. Це співвідношення в тій чи іншій формі може служити критерієм морозостійкості [96].

Відповідно до відомих рекомендацій у бетони з морозостійкістю вище F_{50} введення зольного наповнювача допускається лише після проведення спеціальних досліджень. У роботі [66] встановлено, що при вмісті золи 30...40% маси змішаного в'язучого спостерігається різке збільшення капілярного всмоктування і водопоглинання, особливо в початковий термін випробувань. Дослідження показали також, що при заміні цементу золою істотно зменшується об'єм контракційних пор і, відповідно, зростає співвідношення між капілярною і контракційною пористістю.

Для дослідження морозостійкості модифікованих розчинів були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до плану B_4 . Умови планування наведені у табл. 3.37.

Кінетику зміни міцності бетону по мірі циклічного заморожування і відтавання визначали випробуванням контрольних та основних зразків з визначенням коефіцієнта морозостійкості. Випробування проводили через кожні 25 циклів заморожування і відтавання. У результаті статистичної обробки отриманих експериментальних даних були отримані поліноміальні моделі морозостійкості модифікованих розчинів (табл. 3.38). Їх графічний аналіз представлений на рис. 3.57...3.59.

Таблиця 3.37

Умови планування експерименту при дослідженні морозостійкості модифікованих цементно-зольних розчинів

Технологічні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
В/Ц	X ₁	0,6	0,8	1,0	0,2
З/Ц	X ₂	0	0,35	0,7	0,35
Вміст суперпластифікатора СП-3, % маси в'язучого	X ₃	0	0,35	0,7	0,35
Вміст повітрявтягувальної добавки (ПД), % маси в'язучого	X ₄₍₁₎	0	0,025	0,05	0,025
Вміст водоутримуючої добавки (ЕЦ), %	X _{4(II)}	0	0,15	0,3	0,15

Таблиця 3.38

Математичні моделі морозостійкості модифікованих розчинів

Вид ПФМ	Математичні моделі морозостійкості
СП-3 + ПД	$F = 149,9 - 67,1X_1 - 4,46X_2 + 11,6X_3 + 28,7X_{4(1)} - 36,6X_1^2 - 2,95X_2^2 + 1,95X_3^2 + 3,95X_{4(1)}^2 + 1,125X_1X_2 - 11,6X_1X_{4(1)} - 2,37X_2X_{4(1)} + 2,75X_3X_{4(1)} \quad (3.62)$
СП-3 + ЕЦ	$F = 135,8 - 60,4X_1 - 2,30X_2 + 10,7X_3 + 7,93X_{4(2)} - 33,4X_1^2 + 2,06X_2^2 + 2,06X_3^2 + 2,06X_{4(2)}^2 - 0,688X_1X_2 - 0,688X_1X_3 - 5,44X_1X_{4(2)} + 0,688X_3X_{4(2)} \quad (3.63)$

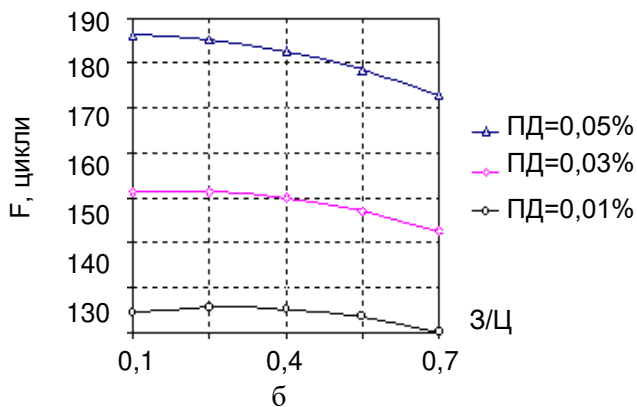
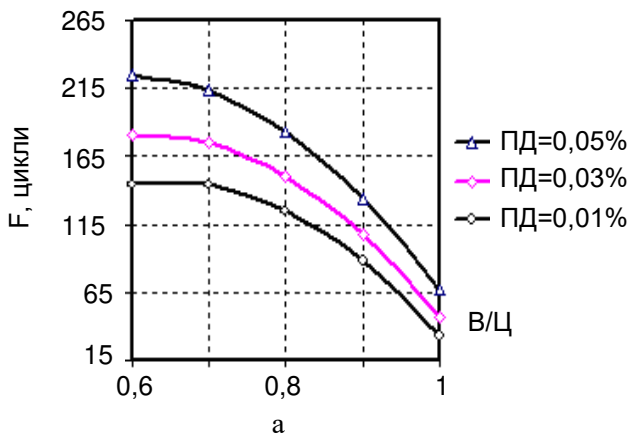


Рис. 3.57. Залежність морозостійкості розчинів, модифікованих ПФМ₁ від:
 а – водоцементного відношення;
 б – золюцементного відношення

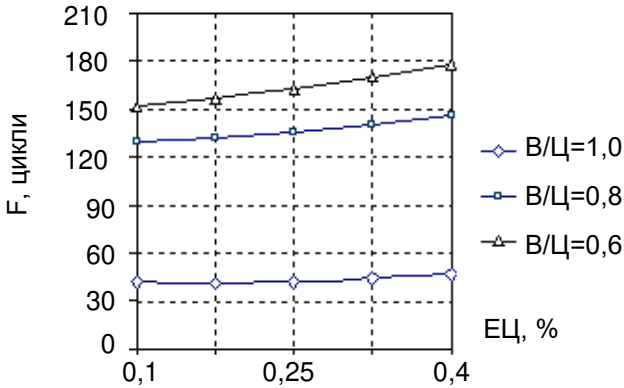


Рис. 3.58. Залежність морозостійкості модифікованих розчинів від вмісту ефіру целюлози

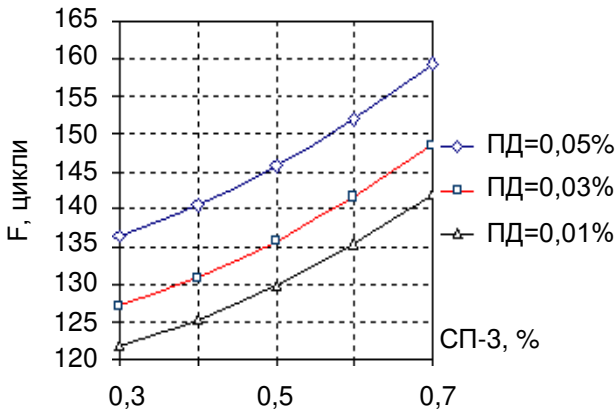


Рис. 3.59. Залежність морозостійкості модифікованих розчинів від вмісту суперпластифікатора СП-3

Аналіз отриманих даних показує, що марка за морозостійкістю досліджених розчинів ($K_{\text{мрз}} \geq 0,95$) коливається в діапазоні F25...F250. Найвищу морозостійкість мають розчини, які містять повітрявтягувальну добавку. Темп падіння міцності таких розчинів по мірі заморожування і відтавання виявився також більш низьким, ніж для розчинів без добавки. Позитивно

впливають на морозостійкість розчинів, хоча і меншою мірою, добавки СП-3 та ефіру целюлози. Для наповнених розчинів з мінімальним вмістом органічних добавок та низькою витратою цементу (В/Ц = 1,0) морозостійкість виявилась в межах 25...75. Нижчу морозостійкість мають розчини з високим вмістом золи.

Компресійним методом для характерних складів визначали об'єм втягнутого повітря. Результати вимірювань наведені в табл. 3.39. З отриманих даних випливає, що у наповнених розчинових сумішах, які містять 0,7% СП-3 повітрявтягування досягає 2%. Це відповідає даним В.С. Рамачандрана та В.М. Мальхотри [97], які встановили, що при введенні в бетонні суміші з суперпластифікатором на основі нафталінсульфокислоти втягується 1...3% повітря.

Таблиця 3.39

Вміст втягнутого повітря в модифікованих розчинах

Склади розчинових сумішей					Об'єм втягнутого повітря, %
В/Ц	З/Ц	Вміст добавок			
		СП-3, % (Ц+З)	ПД, % (Ц+З)	ЕЦ, % (Ц+З)	
1,0	0,4	0,3	0,01	–	0,7
1,0	0,7	0,3	0,01	–	0,6
1,0	0,4	0,7	0,05	–	3,8
1,0	0,4	0,7	–	0,4	2,1
1,0	0,1	0,5	–	–	1,5
1,0	0,7	0,5	–	–	0,9
0,6	0,4	0,3	0,01	–	1,4
0,6	0,4	0,7	0,05	–	5,3
0,6	0,4	0,7	–	0,4	2,0
0,6	0,1	0,5	–	–	1,9
0,6	0,7	0,5	–	–	1,1

Найменша кількість втягнутого повітря виявилась у сумішах з максимальним вмістом золи-виносу. Понижене повітрявтягування у сумішах з високим вмістом дисперсних матеріалів (золи-виносу) відповідає відомим теоретичним уявленням [8].

Включення МК до складу ПФМ сприяє зменшенню обсягу відкритих макропор, які насичуються водою. При однаковому водовмісті розчинових сумішей зменшення об'єму капілярних пор може бути пов'язане зі збільшенням витрати цементу і ступеня його гідратації. Для розчинів з добавками ПФМ, як і для бетонів з МК характерне також більш високе співвідношення загального об'єму пор і об'єму відкритих пір, що також повинно сприяти підвищенню морозостійкості.

Кінетику зміни міцності розчинів по мірі циклічного заморожування і відтавання визначали випробуваннями контрольних і основних зразків з визначенням коефіцієнта морозостійкості. Випробування проводили через кожні 25 циклів заморожування і відтавання. Експериментальні результати наведені на рис. 3.60.

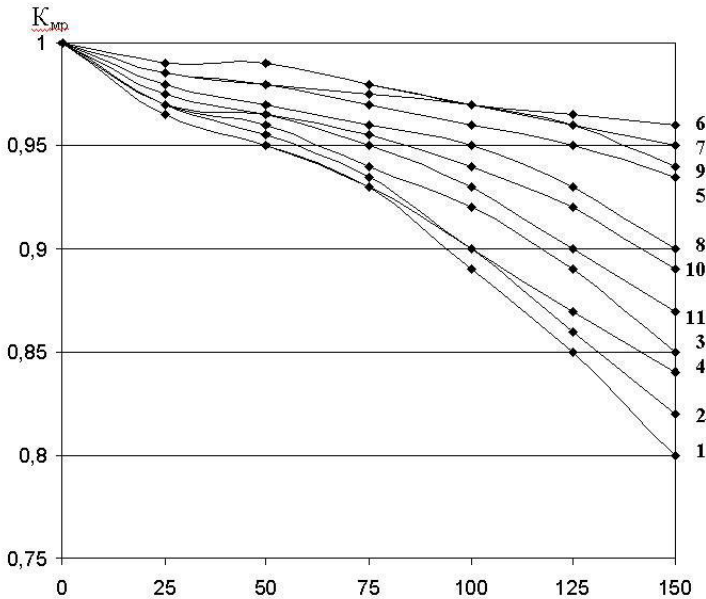


Рис. 3.60. Вплив складу розчинових сумішей на коефіцієнт морозостійкості ($K_{мрз}$) (нумерація кривих за табл. 3.36)

Аналіз отриманих даних показує, що марка за морозостійкістю досліджених розчинів ($K_{\text{МРЗ}} \geq 0,95$) коливається в діапазоні F50...F150. Найвищу морозостійкість мають розчини, які містять 15% МК чи ЗД, 40% золи-виносу при максимальному вмісті органічних компонентів ПФМ. Темп падіння міцності таких розчинів по мірі заморожування і відтавання виявився більш низьким, ніж розчинів без ПФМ чи з мінімальною витратою органічних добавок.

4. СУХІ БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ З ЗАСТОСУВАННЯМ ПИЛУ КЛІНКЕРОВИПАЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

4.1. Пил-винос у клінкеровипалювальних печей – активний компонент в'язучих систем

До пилу-випалу належать частинки сировинної суміші для отримання цементного клінкеру крупністю менше 1 мм, що виносяться з печей і вловлюються в пилоосаджувальних пристроях. Викиди пилу під час роботи печей становлять до 80% усієї кількості пилу, що утворюється в цементному виробництві [141, 142]. Залежно від розмірів і типу печей, наявності в них теплообмінних пристроїв, режиму випалу, способу виробництва цементу, властивостей сировинної суміші та палива пиловинос у середньому коливається в межах від 5 до 20% маси суміші, що подається в піч [141]. Встановлено [143], що найбільше пилу виносяться димовими газами з клінкеровипалювальної печі в кінці зони ланцюгової завіси, а також зони кальцинування. Цей пил утворюється, в основному, в результаті механічного руйнування ланцюгами та стирання сировинних гранул об футерування печі. Помітна кількість пилу може утворюватися також у зонах екзотермічних реакцій та охолодження. Великий пиловинос характерний при застосуванні непластичної сировини, збільшення поверхні теплообмінних пристроїв та швидкості газового потоку.

За речовинним складом пил складається переважно з суміші вапняку, що не розклався, і випаленої глини [143]. Порівняно з вихідною сировинною сумішшю для пилу характерний більший вміст карбонатного компонента та менший – глинистого та залізного компонентів. У складі пилу може бути 10-20% клінкерних мінералів (β і γ - C_2S – 8-10%, C_2F і C_4AF – 10-12%). Вміст вільного CaO збільшується з підвищенням вмісту у пилу клінкерних мінералів від 2 до 14%.

Однією з характерних особливостей пилу є підвищений вміст у ньому лужних сполук, представлених сульфатами, карбонатами і бікарбонатами натрію і калію, а також силкатами змінного складу. Вміст лугів у пилу зазвичай не перевищує 8% [145], хоча наведені [141] дані, що сумарна кількість K_2O+Na_2O в пилу, що уловлюється

електрофільтрами, може змінюватись від 0,3 до 45% при переважанні оксиду калію. Вміст лугів збільшується у найтонших фракціях. У пилу, що накопичується в третьому полі електрофільтра, його може бути в 3-4 рази більше, ніж у бункерах I і II-го полів.

Більш високий вміст лугів у пилу пояснюється особливостями хімічних процесів, що відбуваються в обертових печах при випалі клінкеру [146]. Згідно з даними Ріттера [146] зі зростанням температури в клінкеровипалювальній печі луги, представлені в сировинній суміші і золі палива переважно у вигляді силікатів, витісняються оксидом кальцію. Велика кількість вільних лугів, починаючи від температури близько 800° С надходить до поверхні матеріалу, що випалюється, і випаровується з неї, частина залишається в суміші і входить до складу клінкеру, а частина перетворюється на карбонати, сульфати та гідроксиди лужних металів, взаємодіючи з діоксидом вуглецю та іншими компонентами пічних газів. Луги, що залишаються в газовій фазі, накопичуються в пилу, що виноситься з печі та вловлюється електрофільтрами.

Калій, маючи більший іонний радіус, випаровується більшою мірою, ніж натрій. Тому пил збагачується сполуками калію. Ступінь виносу лугів у пічних газах визначається величиною пиловиносу і температурою газів, що відходять. Пил, що виноситься газами з клінкеровипалювальних печей являє собою полідисперсну систему, в якій переважають тонкі фракції розміром до 20 мкм. При мокрому способі виробництва кількість тонких фракцій становить від 40 до 70%, сухому – до 85% за масою. Згідно з даними Гіпроцементу [147, 148] кількість фракцій 0...10 мкм і 10...20 мкм у пилу обертових печей довжиною більше 100 м, що працюють за мокрим способом виробництва становить відповідно 18...50 і 10...20% за масою, печей довжиною менше 100 м – 20...30 та 23...32%, печей із циклонними теплообмінниками 80...82 та 4...6%.

Пил із пилоосаджувальних камер має питому поверхню 2500-3200 см²/г, а з електрофільтрів 5300...6300 см²/г [1]. Підвищена дисперсність характерна для пилу, утвореного при випалюванні сировинної суміші, що містить крейду і тонкодисперсну глину, при

застосуванні більш щільних і низькопластичних матеріалів пил містить більші частинки.

Основним способом утилізації пилу клінкеровипалювальних печей є повернення його у виробничий процес випалу клінкеру. Розроблені [142, 144] різні способи повернення пилу – домішування його до шламу або сировинного борошна, що надходить у печі у вигляді сухого порошку, гранул або шламу; подача за ланцюгові завіси в пилоподібному або гранульованому стані; вдування в піч з гарячого кінця. Розроблено також способи випалу пилу після коригування його складу в окремій печі та попереднього вилуговування до повернення його в піч. Повернення пилу будь-яким способом ускладнює процес випалу цементного клінкеру і зазвичай негативно позначається на якості цементу у зв'язку зі зростанням у ньому вмісту лугів, збільшення неоднорідності хімічного складу та погіршення структури клінкеру.

Підвищений вміст лугів знижує активність портландцементу та викликає його хибне тужавлення [35], що призводить до швидкої втрати пластичності бетонних та розчинових сумішей, необхідності збільшення витрати води та погіршення всіх основних властивостей бетонів та розчинів. При високому вмісті лугів у цементі зростає небезпека лужної корозії бетону за наявності у заповнювачах реакційно здатного кремнезему. Крім того, надлишковий вміст лугів викликає висоли [141, 146].

Дослідженнями встановлено [142], що тільки при вмісті в шламі лужних оксидів до 0,7...0,8% вся кількість пилу, уловленого електрофільтрами, може подаватися в піч, суттєво не впливаючи на якість клінкеру.

Додавання 5...15% пилу до сировинного шламу може спричинити його коагуляцію та зменшення текучості, залипання ланцюгової завіси, утворення шламових кілець, зниження стійкості вогнетривкої футеровки печей [149].

Поряд з поверненням пилу-виносу в сировинну суміш для виробництва клінкеру розроблено низку інших напрямів його застосування, у тому числі для виробництва в'язучих та розчинів [150-155].

Пил, що утворюється при випалюванні портландцементного клінкеру і вловлюється електрофільтрами, має слабкі в'язучі властивості. Вони зумовлені наявністю в ньому певної кількості клінкерних мінералів, утворених у результаті переважно твердофазових реакцій. Певний внесок у гідравлічну активність пилу може здійснювати взаємодія вільного вапна та дегідратованої глини, що містяться в ньому.

Активність пилу може коливатися в межах 2,5...7,5 МПа. Завдяки цій активності, а також високій дисперсності, що сприяє легкоукладальності розчинових сумішей і запобіганню водовідділення пил рекомендується як добавка до будівельних розчинів марок 25...300. При цьому витрата пилу залежить від марки розчину та в'язучого. Наприклад, для розчину М300 при марці в'язучого М400 витрата пилу рекомендується 40 кг/м³ піску. Для розчину марки 50 при використанні в'язучого М400 витрата пилу приймається 135 кг/м³.

Поряд із мурувальними допускається застосування штукатурних розчинів, у складі яких пил замінює вапно. Співвідношення цемент-пил залежить від складу та активності пилу.

Гідравлічна активність пилу значно збільшується при додаванні гіпсу. За даними В.С. Баталіна [157] добавка гіпсу в кількості 2...3% дозволяє вже в перші терміни твердіння підвищити міцність зразків більш ніж утричі в порівнянні зі зразками з чистого пилу. При цьому підвищений вміст гіпсу негативно впливає на кінцеву міцність в'язучого.

При додаванні пилу в портландцемент спостерігається зниження міцності вже на вмісті пилу понад 5...10% [141]. Відомо про позитивний досвід застосування пилу-виносу як добавки для отримання полегшеного тампонажного портландцементу [158].

Найкращі результати були отримані в композиціях пил-доменний гранульований шлак та пил-шлак-гіпс [159-161]. Поряд з доменним відзначена можливість застосування в комбінації з пилом також фосфорного та ваграночного шлаків. Теоретичною передумовою сумісності шлаку і цементного пилу при отриманні композиційного в'язучого є, головним чином, наявність в останньому розчинних лугів, які мають найбільш сильний активуючий вплив на шлакове скло [162, 163]. Певний активуючий

вплив на гранульований шлак мають також такі компоненти пилу, як вільний оксид і сульфат кальцію.

У лабораторії ґрунтосилікатів Київського інженерно-будівельного інституту вперше отримано шлаколувне в'язуче на основі доменних гранульованих шлаків та високолувного пилу електрофільтрів клінкеровипалювальних печей [159, 161]. При визначенні оптимального співвідношення між шлаком і пилом встановлено, що найвищі показники має в'язуче складу: 75% шлак і 25% пил. При замішуванні водою марка в'язучого змінювалася від 200 до 400 залежно від кількості лужних карбонатів у пилу, а при замішуванні лужними розчинами – від 300 до 700 в залежності від концентрації лужного розчину.

У продуктах гідратації пилошлакового в'язучого, поряд із низькоосновними гідросилікатами тоберморитової групи, кальцитом, змішаними лужно-лужноземельними гідросилікатами ідентифікована комплексна сіль низькоосновних гідросилікатів та кальциту. В.Д. Глуховським та Н.Л. Македон встановлений [159-161] ряд особливостей пилошлакових в'язучих – зростання активності пропорційне концентрації лугів у пилу, підвищена міцність на згин. На основі цих в'язучих можна отримувати розчини та бетони з широким діапазоном марок за міцністю, морозостійкістю, водонепроникністю, що мають високе зчеплення з арматурою та надійно захищають її від корозії.

Цементний пил, а також в'язучі матеріали, отримані активацією доменних або фосфорних шлаків цементним пилом, рекомендовані для будівництва основ доріг із кам'яних матеріалів та ґрунтів [164, 165].

Пил рекомендується [165] розділяти на три сорти залежно від показників хімічної та гідравлічної активності. Хімічний показник активності пилу пропонується розраховувати як відношення загальної кількості СаО в пилу ($CaO_{зар.}$) без урахування СаО, пов'язаної в гіпс, до СаО, пов'язаної в двокальцієвий силікат, трикальцієвий алюмінат та чотирикальцієвий алюмоферит

$$M = \frac{CaO_{зар.} - 1,2в.н.н. - 0,7(SO_3 - 0,85R_2O)}{2,8SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3} \quad (4.1)$$

де: *в.н.н.* – втрати при прожарюванні;

R_2O – вміст лужних оксидів (Na_2O+K_2O).

Гідравлічний показник активності пилу (R) визначають за такою формулою:

$$R = R_{сер} M , \quad (4.2)$$

де $R_{сер}$ – середня марочна міцність цементу ($R_{сер}=40$ МПа).

Для пилу першого сорту значення модуля M має бути більшим за 0,25, $R>10$ другого – $M=0,125\dots 0,25$, $R=5\dots 10$; третього $M<0,125$, $R<5$.

Пил першого сорту може бути використаний як самостійне в'язуче, другого і третього як компонент пилошлакового в'язучого відповідно у кількості 15...25 і 20...30%.

4.2. Реологічні та структурно-механічні властивості водних паст у системах пил-шлак-суперпластифікатор та пил-шлак-цемент-суперпластифікатор

Реологічні властивості паст, утворених при замішуванні в'язучих водою, значною мірою визначають технологічність розчинових сумішей: їх легкоукладальність, збереження в часі, ущільнюваність, розшаровуваність. Структурно-механічні властивості паст істотно впливають на процеси структуроутворення та тверднення розчинів.

Нормальна густина та строки тужавлення. На першому етапі досліджували зміну нормальної густоти та строків тужавлення паст у системах пил-шлак-СП та пил-шлак-цемент-СП. Композиційні в'язучі отримували двома способами:

1) змішуванням меленого доменного гранульованого шлаку ($S_{шт.}=320$ м²/кг), пилу-виносу та суперпластифікатора СП-1 до отримання однорідної суміші;

2) спільним подрібненням зазначених компонентів до певної питомої поверхні.

Враховуючи неминучі коливання складу пилу, зумовлені коливаннями складу сировинної суміші та режимними параметрами випалу клінкеру для досліджень було відібрано дві проби пилу Здолбунівського цементного заводу (ВАТ Діккергоф Україна), хімічний та зерновий склад яких, а також величину питомої поверхні наведено у табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1

Хімічний склад пилу-виносу

Проба пилу	Склад оксидів, %								в.п.п., %
	CaO	CaO _{св}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O	
П ₁	42,5	3,1	19,6	5,3	4,1	0,6	2,4	2,9	19,1
П ₂	41,4	4,2	18,5	4,4	3,9	0,7	3,3	4,9	19,5

Таблиця 4.2

Питома поверхня та зерновий склад пилу-виносу

Проба пилу	Питома поверхня, м ² /кг	Кількість фракцій в % за масою при розмірі часток в мкм				
		0-20	20-40	40-60	60-90	90-200
П ₁	396	51,5	25,4	9,3	11,5	2,1
П ₂	410	53,3	23,6	10,2	10,3	2,5

Пасти готували в лабораторній мішалці за постійної тривалості перемішування вихідних в'язучих з водою. Нормальна густина та строки тужавлення вихідних компонентів композиційних в'язучих наведені в табл. 4.3. Результати визначення даних параметрів для в'язучих, отриманих при змішуванні вихідних компонентів, наведено у табл. 4.4., при сумісному помелі – в табл. 4.5.

Таблиця 4.3

Нормальна густина та строки тужавлення вихідних компонентів композиційних в'язучих

№ п/п	Вид вихідних компонентів	Нормальна густина, %	Строки тужавлення год.-хв.	
			початок	кінець
1	Портландцемент	25,4	2...05	4...10
2	Шлак доменний	29,2	9...10	15...20
3	Пил-виносу (П ₁)	40,5	4...30	9...40
4	Пил-виносу (П ₂)	42,4	1...30	8...20

Використаний у роботі основний гранульований шлак при подрібненні до питомої поверхні, співмірної з питомою поверхнею портландцементу, здатний до тужавлення, хоча і значно повільніше, ніж портландцемент (табл. 4.4). Пил-виносу тужавіє значно швидше, ніж доменний гранульований шлак, що можна пояснити вмістом у

ньому певної кількості клінкерних мінералів, у т.ч. і трикальцієвого алюмінату. Збільшення вмісту лужних сполук у пилу викликає суттєве прискорення початку тужавлення.

Таблиця 4.4

Нормальна густина та строки тужавлення паст на основі композиційних в'язучих, отриманих шляхом змішування вихідних компонентів

№ з/п	Склад в'язучого (співвідношення компонентів за масою)	Вміст СП, % за масою	Нормальна густина, %	Строки тужавлення год.-хв.	
				початок	кінець
1	Шлак:пил (П ₁)-1:1	-	35	8...18	14...10
2	Шлак: пил (П ₂)-1:1	-	33,4	6...15	12...20
3	Шлак: пил (П ₁)-1:1	1	28,5	6...25	11...50
4	Шлак: пил (П ₂)-1:1	1	28,2	5...15	10...40
5	Цемент:шлак: пил (П ₁)-2:1:1	-	31,5	3...30	6...50
6	Цемент:шлак: пил (П ₂)-2:1:1	-	27,4	2...40	5...30
7	Цемент:шлак: пил (П ₁)-2:1:1	1	25,5	2...30	5...10
8	Цемент:шлак: пил (П ₂)-2:1:1	1	24,8	2...10	4...30

Комбінування шлаку та пилу дозволяє значно прискорити строки тужавлення композицій на їх основі, що свідчить про суттєву інтенсифікацію процесів структуроутворення при поєднанні цих двох речовин. Цей ефект можна пояснити комбінованою активацією шлаку лугами, сульфатами, вільним вапном, що містяться в пилу.

Деякий ефект, що прискорює тужавлення, спостерігається (табл. 4.4, 4.5) при введенні до складу в'язучого суперпластифікатора та підвищення тонкості помелу. У першому випадку на швидкість тужавлення, очевидно, впливає зменшення водов'язучого відношення, у другому – збільшення реакційної здатності в'язучого, що сприяє

швидшому утворенню коагуляційної структури та кристалічних зародків гідратних новоутворень.

Таблиця 4.5

Нормальна густина та строки тужавлення паст на основі композиційних в'язучих, отриманих шляхом спільного помелу вихідних компонентів

№ з/п	Вид в'язучого	Вміст СП, % за масою	Питома поверхня, м ² /кг	Нормальна густина, %	Строки тужавлення год.-хв.	
					початок	кінець
1	Шлак+пил (П ₁)	-	350	29,2	2...10	8...30
2	Шлак+ пил (П ₂)	1	370	23,1	1...40	6...40
3	Шлак+ пил (П ₁)	-	580*	31,4	1...30	4...50
4	Шлак+ пил (П ₂)	1	660*	21,8	0...40	1...30
5	Шлак+ пил (П ₁)	-	340	28,4	1...40	6...30
6	Шлак+ пил (П ₂)	1	380	22,6	1...10	5...50
7	Шлак+ пил (П ₂)	-	590*	31,5	1...10	3...50
8	Шлак+ пил (П ₂)	1	640*	22,9	0...10	1...10
9	Цемент+шлак+пил (П ₁)	-	330	27,4	0...30	5...10
10	Цемент+шлак+пил (П ₁)	1	360	22,3	0...38	4...30
11	Цемент+шлак+пил (П ₁)	-	590*	29,5	0...25	1...10
12	Цемент+шлак+пил (П ₁)	1	630*	22,5	0...21	0...40
13	Цемент+шлак+пил (П ₂)	-	320	28,1	0...15	4...50
14	Цемент+шлак+пил (П ₂)	1	350	22,7	0...20	3...39
15	Цемент+шлак+пил (П ₂)	-	620*	31,4	0...17	0...45
16	Цемент+шлак+пил (П ₂)	1	630*	23,1	0...15	0...37

*- вводили інтенсифікатор помелу – полігліколь (0,03% маси в'язучого)

Примітка: Склад в'язучих шлак+пил – 1:1 (за масою), цемент+шлак+пил – 2:1:1 (за масою).

Введення при спільному помелі до в'язучого на основі доменного шлаку та пилу клінкеровипалювальних печей портландцементу різко прискорює строки тужавлення. Для трикомпонентного композиційного в'язучого, отриманого при спільному помелі, вони стають значно коротшими, ніж для портландцементу (початок тужавлення досягає 15-20 хв. (табл. 4.5). При звичайному перемішуванні портландцементу з меленим шлаком і пилом строки тужавлення в'язучого також прискорюються, хоча значно меншою мірою (табл. 4.4). Вочевидь, що при спільному

подрібненні компонентів має місце механо-хімічна активація композиційного в'язучого.

Доведення у складі в'язучого загальної кількості двоводного гіпсу до 7...8% (зміст SO_3 – 4...5% за масою) дозволяє довести строки тужавлення композиційних в'язучих до рекомендованих стандартом для портландцементу.

Нормальна густина композиційних в'язучих коливається від 35 до 22% залежно від складу, способу одержання та дисперсності. В'язучі, отримані при спільному подрібненні компонентів, мають дещо меншу нормальну густоту, ніж при змішуванні. У процесі спільного подрібнення можливе проходження первинних механо-хімічних процесів і величина водопотреби суттєво починає відхилятися від знайденої з умови адитивності водопотреб окремих компонентів.

Як відомо [167, 131], на водопотребу цементних паст впливає вид і концентрація катіонів, що переходять у воду замішування. Залежно від виду катіонів та їх концентрації у цементно-водній системі переважають процеси диспергування чи агрегації частинок в'язучого. За даними, наведеними в роботі [167], нормальна густина цементного тіста з добавками хлоридів натрію та калію при концентрації $0,5 \cdot 10^3$ моль/м³ виявилася практично такою самою, як і без добавок. За нашими даними (табл. 4.4 та 4.5) збільшення в пилу вмісту розчинних лугів призвело до деякого зниження нормальної густоти композиційних в'язучих. Про певну розріджувальну дію лужних солей згадують інші автори [54].

Найбільш відчутний розріджуючий ефект як на двох-, так і на трикомпонентні композиційні в'язучі надає добавка суперпластифікатора. При питомій поверхні 320-370 м²/кг введення добавки 1% СП-1 від маси в'язучого знижує його нормальну густоту на 18-21% (рис. 4.1). Підвищення тонкості помелу в'язучих до 580...660 м²/кг призводить до незначного збільшення нормальної густоти, що компенсується введенням добавки суперпластифікатора.

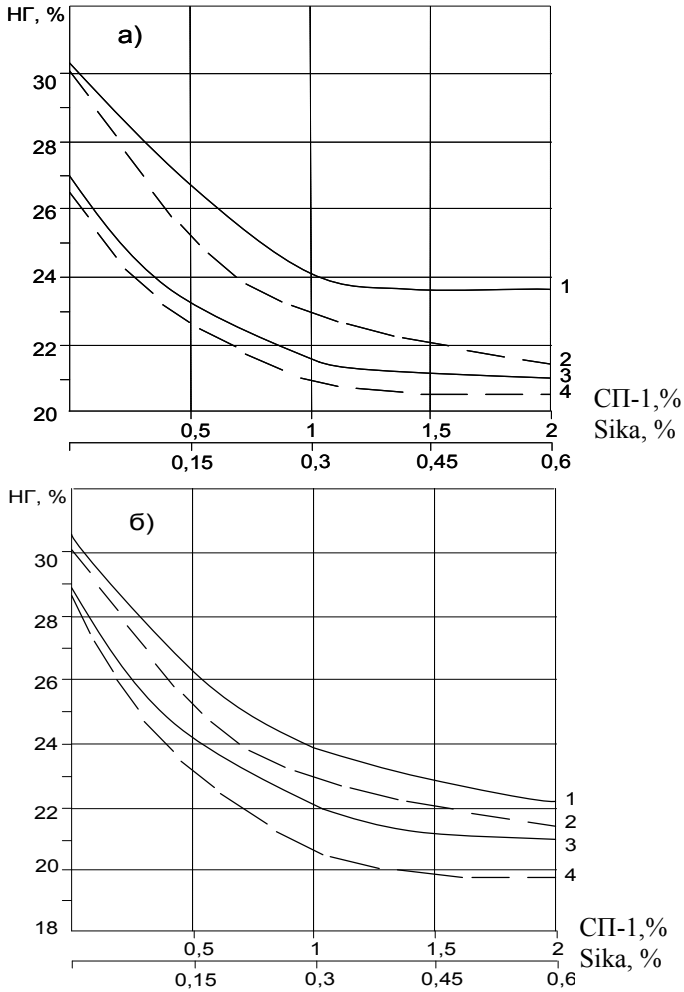


Рис. 4.1. Вплив виду та кількості добавки суперпластифікатора на нормальну густоту композиційних в'язучих, отриманих спільним помелом вихідних компонентів:
 – в'язучі з добавкою СП СП-1%; - - в'язучі з добавкою Sika.
 а) $S_{плт} = 330-370 \text{ м}^2/\text{кг}$; 1, 2 – шлак:пил – 1:1;
 3, 4 – портландцемент:шлак:пил – 2:1:1.
 б) $S_{плт} = 580-660 \text{ м}^2/\text{кг}$; 1, 2 – шлак:пил – 1:1;
 3, 4 – портландцемент:шлак:пил – 2:1:1

Досліджували вплив виду та концентрації добавки суперпластифікатора (СП) на нормальну густоту композиційних в'язучих. Поряд із впливом добавки СП-1 – СП нафталін-формальдегідного типу визначали вплив добавки СП полікарбоксилатного (Sika VC 225) типу.

Результати дослідів наведено на рис. 4.1. Вони показують, що застосування полікарбоксилатного суперпластифікатора дозволяє досягти більшого зниження нормальної густоти композиційних в'язучих, ніж нафталін-формальдегідного, хоча різниця у водоредукуючому ефекті при введенні СП обох типів виявилася незначною. У першому випадку при введенні 2% добавки СП від маси в'язучого вдається знизити НГ трикомпонентних в'язучих до 20...21%, у другому при 0,6% добавки до 19...20%. Основний водоредукуючий ефект добавки СП-1 як у дво-, так і у трикомпонентних в'язучих проявляється при вмісті 1%, добавки Sika – 0,3% за масою.

В'язкість водних паст на основі композиційних в'язучих значною мірою визначає легкоукладальність розчинових сумішей. Для вивчення впливу складу паст на їхню в'язкість застосовували метод ротаційної реометрії та віскозиметр РВ-8М. Важливою перевагою ротаційної реометрії є можливість реалізації за її допомогою практично необмежених деформацій зсуву [87]. В'язкість паст досліджували за допомогою алгоритмізованих експериментів, виконаних відповідно до типового плану В4 [168]. В'язкість паст (η) визначали через 2...3 хв. після замісу та розраховували за формулою:

$$\eta = k \frac{P - P_0}{N} \tau, \quad (4.3)$$

де k – константа приладу;

P – вага вантажів;

N – число обертів;

τ – тривалість одного обороту;

P_0 – навантаження холостого ходу приладу ($P_0=12,4$ г).

Умови планування експериментів щодо визначення в'язкості наведені в табл. 4.6, матриця плану В4 та результати дослідів у табл. 4.7.

Таблиця 4.6

Умови планування експериментів при вивченні в'язкості паст

№ з/п	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Найменування	Кодовий вид	-1	0	+1	
1	Об'ємна концентрація пилу в пилошлаковому наповнювачі (ПШН) – C_1	X_1	0	0,5	1	0,5
2	Об'ємна концентрація ПШН у композиційному цементно-пилошлаковому в'язучому – C_2	X_2	0	0,25	0,5	0,25
3	Об'ємна концентрація композиційного в'язучого у водній пасті C_3	X_3	0,7	0,8	0,9	0,1
4	Вміст суперпластифікатора (СП-1) в композиційному в'язучому, % за масою – C_4	X_4	0	0,5	1	0,5

Перехід від об'ємних концентрацій (C) до об'ємних витрат компонентів у пастах відповідно до умов планування експериментів здійснювали за формулами, знайденими з умови:

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1$$

або

$$\frac{V_n}{V_n + V_{ш}} + \frac{V_n + V_{ш}}{V_n + V_{ш} + V_{ц}} + \frac{V_n + V_{ш} + V_{ц}}{V_n + V_{ш} + V_{ц} + V_{в}} = 1, \quad (4.4)$$

де $V_n, V_{ш}, V_{ц}, V_{в}$ – відповідно питомі об'ємні витрати в одиниці об'єму пасту пилу-виносу, доменного шлаку, цементу та води.

З умови (4.4) випливає, що $V_n = C_1 C_2 C_3$; $V_{ш} = (1 - C_1) C_2 C_3$; $V_{ц} = (1 - C_2) C_3$; $V_{в} = 1 - C_3$.

Таблиця 4.7

Матриця планування та результати дослідів
з вивчення в'язкості водних паст
на основі композиційних в'язучих

Точки плану	Фактори				В'язкість, 10^{-1} Па·с	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	η_1	η_2
1	+1	+1	+1	+1	38,5	32,3
2	+1	+1	+1	-1	53,2	49,4
3	+1	+1	-1	+1	31,4	25,3
4	+1	+1	-1	-1	42,6	39,3
5	+1	-1	+1	+1	19,7	18,7
6	+1	-1	+1	-1	27,8	28,1
7	+1	-1	-1	+1	16,3	15,4
8	+1	-1	-1	-1	25,6	26,1
9	-1	+1	+1	+1	28,1	35,4
10	-1	+1	+1	-1	38,5	41,4
11	-1	+1	-1	+1	19,5	16,1
12	-1	+1	-1	-1	27,8	27,5
13	-1	-1	+1	+1	23,5	24,3
14	-1	-1	+1	-1	33,3	32,8
15	-1	-1	-1	+1	15,8	15,5
16	-1	-1	-1	-1	24,8	25,5
17	+1	0	+1	0	29,4	28,3
18	-1	0	+1	0	22,3	21,6
19	0	+1	0	0	31,7	30,4
20	0	-1	0	0	26,7	27,8
21	0	0	+1	0	30,8	31,5
22	0	0	-1	0	24,6	23,7
23	0	0	0	+1	21,2	21,6
24	0	0	0	-1	34,4	35,5

Примітка: η_1 – в'язкість в'язучого, одержаного перемішуванням вихідних компонентів; η_2 – в'язкість в'язучого, отриманого спільним помелом вихідних компонентів до $S_{\text{шт}}=350\dots380 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати наведені рівняння регресії, адекватні при 95% довірчої ймовірності, які можна розглядати як експериментально статистичні моделі ефективної в'язкості водних паст на основі композиційних в'язучих в системі портландцемент-гранульований доменний шлак-пил клінкеровипалювальних печей:

$$\eta_1 = 27,16 + 2,85X_1 + 5,48X_2 + 3,64X_3 - 5,26X_4 - 1,35X_1^2 + 1,99X_2^2 + 0,49X_3^2 + 0,59X_4^2 + 3,74X_1X_2 - 0,76X_1X_3 - 0,36X_1X_4 + 0,95X_2X_3 - 0,53X_2X_4 - 0,33X_3X_4 \quad (4.5)$$

$$\eta_2 = 27,32 + 1,28X_1 + 4,64X_2 + 4,45X_3 - 5,66X_4 - 2,41X_1^2 + 1,74X_2^2 + 0,24X_3^2 + 1,19X_4^2 + 2,23X_1X_2 - 1,68X_1X_3 - 0,96X_1X_4 + 1,81X_2X_3 - 0,62X_2X_4 + 0,32X_3X_4 \quad (4.6)$$

Графічний аналіз основних залежностей, що впливають з отриманих моделей, наведено на рис. 4.2. З нього можна бачити, що в досліджуваному факторному просторі в'язкість паст може змінюватися майже в 4 рази, досягаючи найбільших значень при максимальному вмісті пилу-виносу, мінімальному водовмісті та відсутності добавки суперпластифікатора. Зі зменшенням вмісту пилу в пилошлаковому наповнювачі його вплив на збільшення в'язкості суттєво зменшується. Вміст суперпластифікатора в пасті на основі композиційних в'язучих є найбільш сильним компенсаційним фактором, що стабілізує збільшення в'язкості при насиченні паст пилом.

Другим фактором за інтенсивністю впливу на в'язкість паст при певному вмісті пилошлакового наповнювача є об'ємна концентрація композиційного в'язучого у водній пасті, яка прямо відображає вплив водов'язучого відношення.

Рівняння регресії (4.5, 4.6) дозволяють залежно від значення фактора X_3 і відповідно від водов'язучого відношення регулювати дозу суперпластифікатора, що забезпечує незмінну в'язкість залежно від вмісту наповнювача та співвідношення в ньому шлаку та пилу (рис. 4.3). Характер впливу досліджуваних факторів на в'язкість досить близький для паст, отриманих змішуванням та спільним помелом компонентів в'язучих.

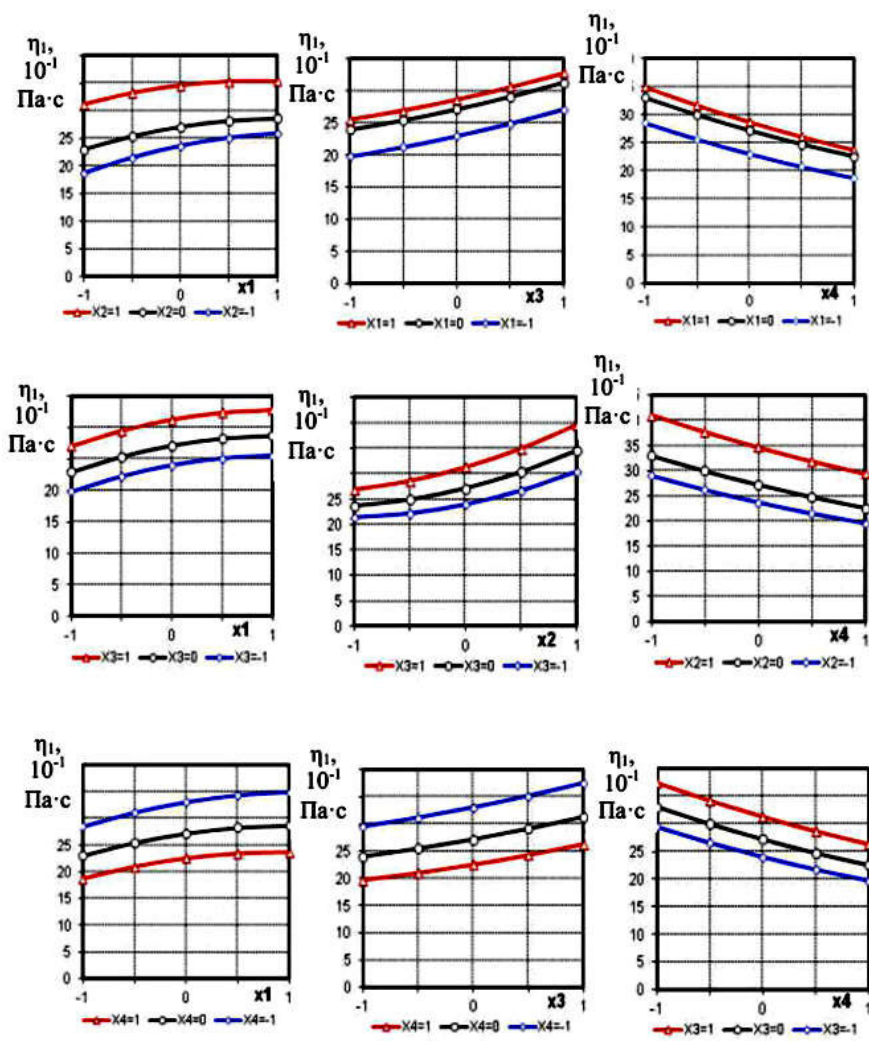


Рис. 4.2 а. В'язкість водних паст на основі композиційного в'язучого, отриманого змішуванням вихідних компонентів.

Примітка: Крім двох досліджених, решта варійованих факторів знаходиться на нульовому (основному) рівні.

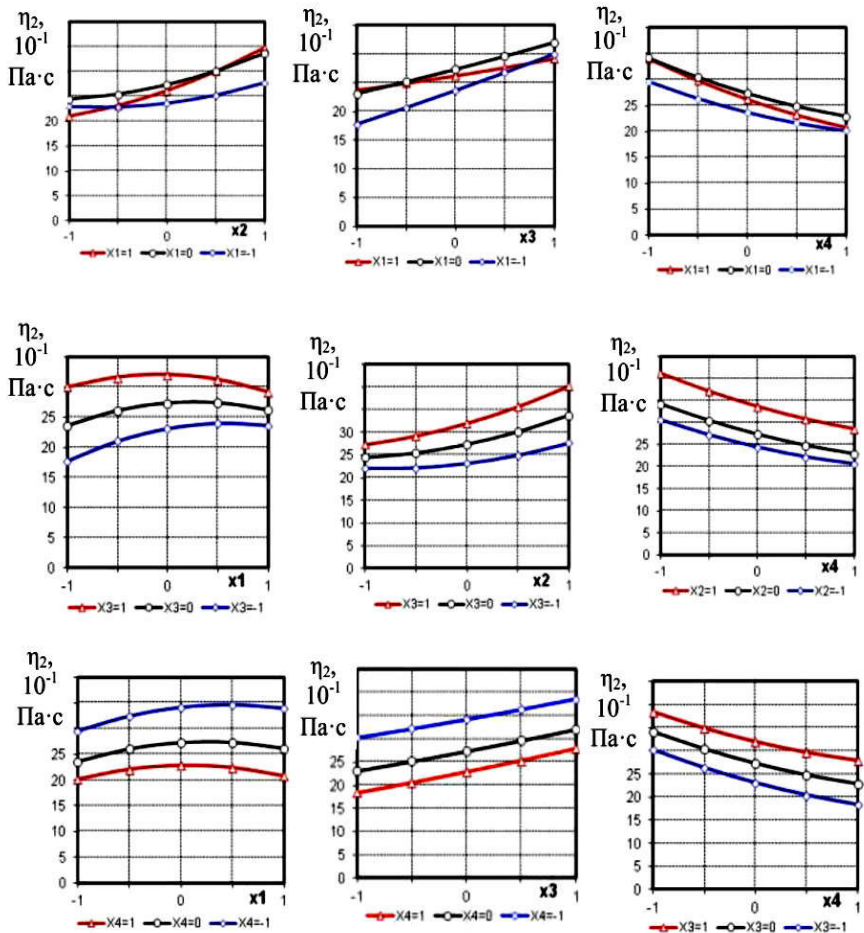


Рис. 4.2 б. В'язкість водних паст на основі композиційного в'яжучого, отриманого спільним помелом вихідних компонентів до $S_{\text{пит}}=350-380 \text{ м}^2/\text{кг}$

Примітка: Крім двох досліджених, решта варійованих факторів знаходиться на нульовому (основному) рівні.

Особливості початкового твердіння в'яжуче-водних дисперсій характеризує пластична міцність, що визначається граничним напруженням зсуву дисперсної системи у певний

період. Відповідно до сучасних теоретичних уявлень [119] процес структуроутворення в'язучих систем можна розділити на три періоди:

- 1) індукційний, безпосередньо після замісу в'язучого водою;
- 2) період коагуляційного структуроутворення (тужавлення);
- 3) період кристалізаційного структуроутворення.

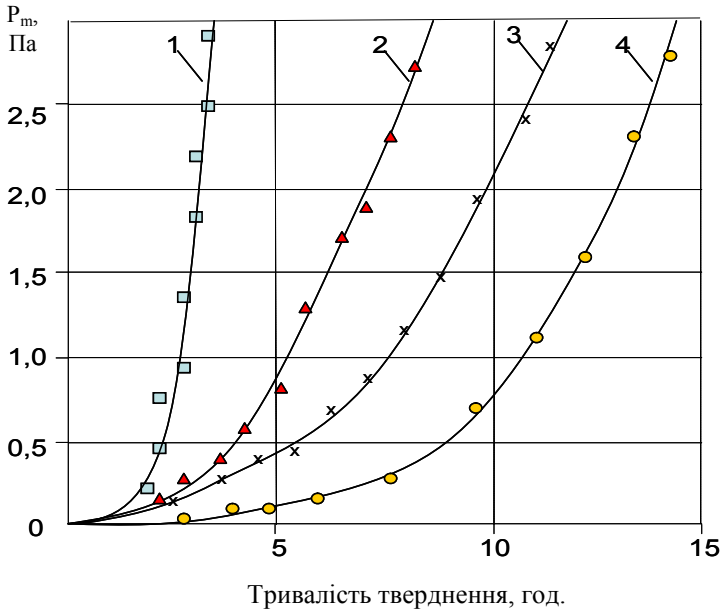


Рис.4.3. Пластична міцність паст на основі двокомпонентних в'язучих складу шлак-пил (ПІ) 1:1 (за масою): 1 – $S_{\text{пшт}}=660 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1% СП-1; 2 – $S_{\text{пшт}}=580 \text{ м}^2/\text{кг}$; 3 – $S_{\text{пшт}}=370 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1% СП-1; 4 – $S_{\text{пшт}}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$

Величину пластичної міцності паст визначали за допомогою кінцевого пластометра МДУ. Глибину занурення конуса фіксували індикатором із ціною поділки 0,1 мм. Розрахунок пластичної міцності проводили за такою формулою:

$$P_m = 0,096 P / h^2, \quad (4.7)$$

де P – вага конуса з привантаженням, Н;
 h – глибина занурення конуса в мм.

Пластограми для характерних складів паст при водов'язучих відношеннях, що відповідають нормальній густоті, наведено на рис. 4.3...4.5. Їхньою загальною особливістю є наявність на кривих двох ділянок [87].

Перша характеризує тривалість формування тиксотропної коагуляційної структури, друга відображає початок формування кристалізаційної структури. Співставлення тривалості першої ділянки пластограм (рис. 4.4...4.5) із тривалістю тужавлення паст (табл. 4.4, 4.5) показує їх відповідність.

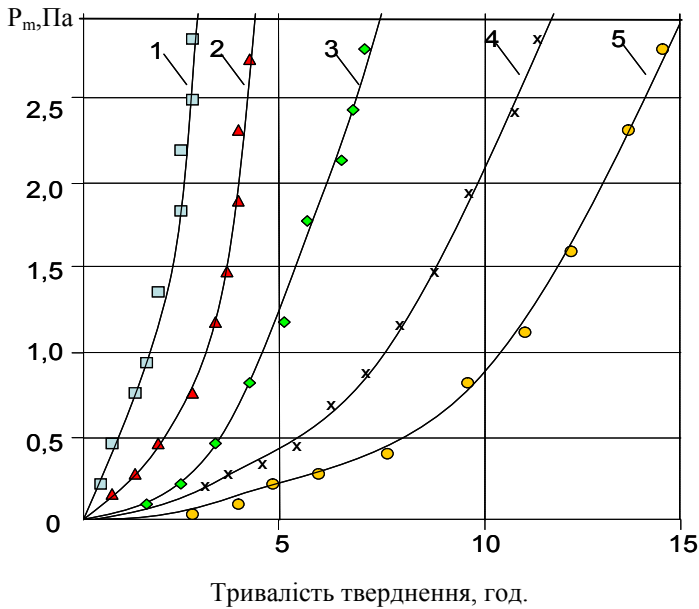


Рис.4.4. Пластична міцність паст на основі трикомпонентних в'язучих складу портландцемент-шлак-пил (ПІ) 2:1:1 (за масою):
 1 – $S_{\text{пшт}}=630 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1% СП-1; 2 – $S_{\text{пшт}}=590 \text{ м}^2/\text{кг}$;
 3 – $S_{\text{пшт}}=630 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1% СП-1, гіпсовий камінь – 3%,
 4 – $S_{\text{пшт}}=360 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1% СП-1; 5 – $S_{\text{пшт}}=330 \text{ м}^2/\text{кг}$

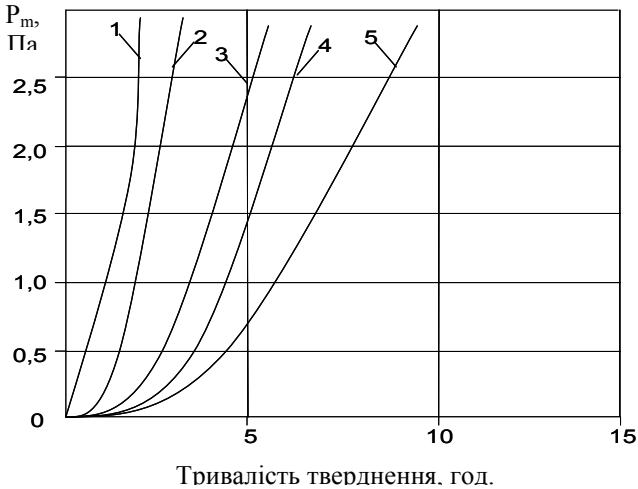


Рис. 4.5. Пластична міцність паст на основі трикомпонентних в'язучих складу портландцемент-шлак-пил (П2) 2:1:1 (за масою):

- 1 – $S_{\text{пит}}=630 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1% СП-1; 2 – $S_{\text{пит}}=620 \text{ м}^2/\text{кг}$
 3 – $S_{\text{пит}}=630 \text{ м}^2/\text{кг}$, гіпсовий камінь – 3%;
 4 – $S_{\text{пит}}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$, СП-1% – 1%; 5 – $S_{\text{пит}}=320 \text{ м}^2/\text{кг}$

Точки перегину на пластограмах, розділяючи першу і другу ділянку приблизно збігаються з кінцем тужавлення паст. Фактори, що сприяють прискоренню часу тужавлення, зменшенню водов'язучого відношення при введенні суперпластифікатора та збільшенню питомої поверхні сприяють також скороченню періоду коагуляційного структуроутворення. Ці ж чинники сприяють зміцненню коагуляційної структури та інтенсифікації процесу утворення кристалізаційної структури. Паста на основі трикомпонентних в'язучих в системі портландцемент-шлак-пил, отриманих при помелі до питомої поверхні понад $500 \text{ м}^2/\text{кг}$, характеризуються дуже короткою ділянкою на пластограмах, що відповідає коагуляційному структуроутворенню. Додаткове введення в пасту, отримані на основі в'язучих з високою питомою поверхнею, двоводного гіпсу сприяє подовженню періоду, що відповідає стабільності коагуляційної структури. Разом з тим, після закінчення тужавлення для таких паст характерно більш інтенсивне формування кристалізаційного каркасу структури, що твердіє.

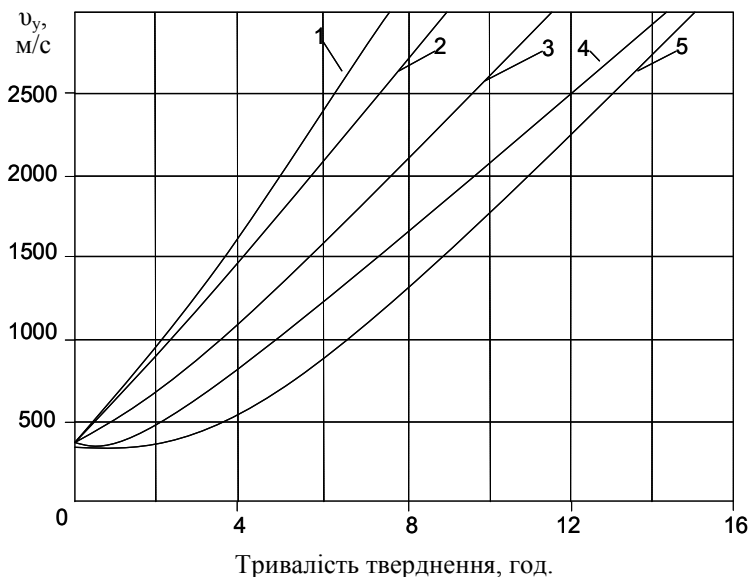


Рис. 4.6. Швидкість проходження ультразвукових хвиль у пастах, що твердіють, на основі композиційних в'язучих

цемент: шлак: пил (П2) 2:1:1 (за масою);

1 – $S_{\text{питг}}=630 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1% СП-1; 2 – $S_{\text{питг}}=590 \text{ м}^2/\text{кг}$;

3 – $S_{\text{питг}}=360 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1% СП-1; 4 – $S_{\text{питг}}=330 \text{ м}^2/\text{кг}$;

5 – $S_{\text{питг}}=630 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1% СП-1, гіпсовий камінь – 3%

Коливання у пилу вмісту лугів, як зазначалося раніше, призводить до певного прискорення початку тужавлення, проте кінець тужавлення і відповідно період існування коагуляційної структури паст помітно не змінюється.

Початковий період структуроутворення паст на основі композиційних в'язучих вивчали також імпульсним ультразвуковим методом [169]. Вимір часу проходження ультразвукових хвиль здійснювали за допомогою приладу УК-10П на частотах 60 кГц з точністю 0,25-0,5 мкс. Вимірювання проводилося на свіжовиготовлених зразках-кубах з розмірами 7,07×7,07×7,07 см у формах з плексигласу при твердінні зразків у

нормальних умовах. Час τ_y та швидкість проходження ультразвукових хвиль v_y визначали за формулами:

$$\tau_y = f_2 - f_1 \quad (4.8)$$

$$v_y = l_0 \tau_y (f_2 - f_1) \quad (4.9)$$

де l_0 – базовий розмір зразка ($l_0=7,07$ см);

f_2-f_1 – різниця частот.

На кривих швидкості проходження ультразвукових хвиль початковий період формування коагуляційної структури характеризується горизонтальною ділянкою рис. 4.6, довжина якої близька за величиною до тривалості початку тужавлення.

Як і на кривих зміни в часі пластичної міцності швидкість формування кристалізаційної структури можна пов'язати з кутом нахилу кривих швидкості проходження ультразвукових хвиль через пасти, що твердіють. Через 14...18 год після замішування швидкість проходження ультразвукових хвиль збільшується в 4-5 разів. На величину v_y як і P_m найбільш істотно впливає величина питомої поверхні композиційних в'язучих та водов'язуче відношення.

Особливості гідратації композиційних в'язучих

В основі процесів твердіння композиційних в'язучих в системах доменний гранульований шлак-пил і портландцемент-доменний гранульований шлак-пил лежать процеси гідратації клінкерних мінералів і шлакового скла в умовах підвищеного вмісту лужних оксидів і SO_3 .

Теоретичні основи процесів гідратації в'язучих даного типу детально розроблені науковою школою проф. В.Д. Глуховського [88-90]. На основі відомих теоретичних уявлень розглянуто вплив складу паст дво- та трикомпонентних композиційних в'язучих на ступінь їх гідратації та кінетику зміни його в часі.

Ступінь гідратації в'язучих, як відомо, один із характерних показників хімічної активності, безпосередньо пов'язаний із міцністю штучного каменю на їх основі. Вперше Т.К. Пауерс [170] запропонував для міцності цементного каменю залежність:

$$R_{ц.к.} = AX^n, \quad (4.10)$$

де A – константа, що характеризує міцність цементного гелю ($A \approx 240 \text{ МПа}$);

n – константа, що характеризує особливості цементу (для портландцементу $n \approx 2,6 - 3$);

X – відношення об'єму цементного гелю до сумарного об'єму гелю та порожнин (модифікований структурний критерій Фере [119]).

За Пауерсом параметр X можна знайти за формулою:

$$X = \frac{K_r V_{ц} \alpha}{\alpha V_{ц} + B / Ц} \approx \frac{0,647 \alpha}{0,319 \alpha + B / Ц}, \quad (4.11)$$

де $K_r = 2,09 \dots 2,2$ – коефіцієнт збільшення об'єму продуктів гідратації;

$V_{ц}$ – питомий об'єм цементу ($V_{ц} = 1 / \rho_{ц} = 0,319 \text{ см}^3/\text{г}$);

$B / Ц$ – водоцементне відношення;

α – ступінь гідратації, тобто частина цементу, що пройшла гідратацію.

Близькі критерію Пауерса критерії міцності цементного каменю було запропоновано багатьма дослідниками [171-173]. О.Е.Шейкін зв'язав міцність цементного каменю зі ступенем гідратації через величину відносної густини:

$$d_{відн.} = \rho_{о.ц.к.} / \rho_{ц.к.} = (1 + 0,23 \alpha \rho_{ц}) (1 + \rho_{ц} B / Ц), \quad (4.12)$$

$$R_{ц.к.} = 310 d_{відн.}^{2,7}$$

де $\rho_{о.ц.к.}$ – середня густина цементного каменю в сухому стані;

$\rho_{ц.к.}$ – справжня густина цементного каменю.

Разом з тим, як зазначається в роботі [118] для композиційних в'язучих низької водопотреби (ВНВ) характерний незважаючи на високу міцність нижчий ступінь гідратації як у ранньому віці, так і при тривалому твердінні. Невідповідність між ступенем гідратації та міцності пояснюється [174] складом та будовою гідратних новоутворень, а також структурою цементного каменю.

Ступінь гідратації досліджували шляхом визначення кількості зв'язаної води [175]. З паст нормальної густоти

виготовляли зразки-кубики з ребром 2 см, що зберігалися в нормальних умовах. Через заданий термін твердіння зразки подрібнювалися в порошок до повного проходу через сито №008, наважка оброблялася етиловим спиртом, висушувалася при температурі 100°C до постійної маси і піддавалася прожарюванню при 1000°C. Кількість хімічно зв'язаної води визначали за формулою:

$$X_1 = (a - b)/a, \quad (4.13)$$

де a – маса сухого зразка до прожарювання;

b – маса зразка після прожарювання.

Ступінь гідратації в'язучих α розраховували за формулою:

$$\alpha = X_1/X_2, \quad (4.14)$$

де X_2 – кількість зв'язаної води за повної гідратації.

Величину X_2 визначали після дворазової тепловологісної обробки зразків з проміжним подрібненням.

Значення ступеня гідратації зразків з паст на основі дво- та трикомпонентних композиційних в'язучих у віці 3, 7 та 28 діб наведено у табл. 4.8.

Аналіз даних табл. 4.8 показує, що ступінь гідратації двокомпонентних в'язучих в 1,5...2 рази нижчий, ніж трикомпонентних. У тому й іншому випадку ступінь гідратації змінюється в часі нелінійно, швидкість гідратації зменшується з переходом від 3 до 7, а потім до 28 діб.

Збільшення вмісту лугів у пилу призводить до деякого збільшення ступеня гідратації композиційних в'язучих внаслідок додаткової активізації шлакового компонента. До збільшення ступеня гідратації на 20...40% призводить збільшення питомої поверхні в'язучих від 350...380 до 580...660 м²/кг. Вміст у складі в'язучого добавки суперпластифікатора знижує ступінь гідратації композиційних в'язучих, що особливо помітно в перші терміни твердіння.

Таблиця 4.8

Значення ступеня гідратації паст на основі композиційних в'язучих, отриманих шляхом спільного помелу вихідних компонентів

№	Вид в'язучого (співвідношення складових за масою)	Вміст СП, % за масою	Питома поверхня м ² /кг	Ступінь гідратації у віці, діб.		
				3	7	28
1	шлак+пил (П ₁)	-	350	0,20	0,31	0,35
2	шлак+пил (П ₁)	1	370	0,17	0,28	0,32
3	шлак+пил (П ₁)	-	580	0,24	0,36	0,40
4	шлак+пил (П ₁)	1	660	0,21	0,34	0,39
5	шлак+пил (П ₂)	-	340	0,22	0,38	0,43
6	шлак+пил (П ₂)	1	380	0,20	0,31	0,37
7	шлак+пил (П ₂)	-	590	0,25	0,37	0,41
8	шлак+пил (П ₂)	1	640	0,21	0,37	0,42
9	цемент+шлак+пил (П ₁)	-	330	0,30	0,48	0,56
10	цемент+шлак+пил (П ₁)	1	360	0,27	0,46	0,55
11	цемент+шлак+пил (П ₁)	-	590	0,38	0,58	0,64
12	цемент+шлак+пил (П ₁)	1	630	0,34	0,55	0,62
13	цемент+шлак+пил (П ₂)	-	320	0,31	0,50	0,61
14	цемент+шлак+пил (П ₂)	1	350	0,29	0,49	0,60
15	цемент+шлак+пил (П ₂)	-	620	0,40	0,61	0,69
16	цемент+шлак+пил (П ₂)	1	630	0,36	0,59	0,67
17	цемент+шлак+пил+гіпсовий камінь 3% (П ₁)	-	590	0,39	0,59	0,66
18	цемент+шлак+пил+гіпсовий камінь 3% (П ₁)	1	630	0,35	0,55	0,63

Примітка: Склад в'язучих шлак+пил – 1:1 (за масою), цемент+шлак+пил – 2:1:1 (за масою).

Паралельно з визначенням ступеня гідратації визначали також на зразках-кубиках з ребром 2 см міцність та відносну густину цементного каменю. Результати дослідів наведено у табл.4.9.

Таблиця 4.9

Міцність та відносна густина цементного каменю
на основі композиційних в'язучих

Вид в'язучого за табл.4.8	Нормальна густина, %	Вміст СП, % за масою	Питома поверхня м ² /кг	Міцність, МПа / Відносна густина цементного каменю у віці, діб		
				3	7	28
1	24,2	-	350	$\frac{8,3}{0,659}$	$\frac{14,2}{0,703}$	$\frac{18,4}{0,719}$
2	23,2	1	370	$\frac{12,5}{0,659}$	$\frac{17,8}{0,704}$	$\frac{24,3}{0,720}$
3	31,4	-	580	$\frac{11,2}{0,600}$	$\frac{16,3}{0,643}$	$\frac{21,5}{0,657}$
4	21,8	1	660	$\frac{17,4}{0,692}$	$\frac{23,6}{0,746}$	$\frac{30,3}{0,767}$
5	28,4	-	340	$\frac{8,8}{0,622}$	$\frac{15,6}{0,682}$	$\frac{19,5}{0,700}$
6	22,6	1	380	$\frac{13,1}{0,678}$	$\frac{18,4}{0,723}$	$\frac{24,9}{0,748}$
7	31,5	-	590	$\frac{12,4}{0,603}$	$\frac{17,6}{0,645}$	$\frac{25,2}{0,660}$
8	22,9	1	640	$\frac{17,8}{0,679}$	$\frac{25,1}{0,744}$	$\frac{31,8}{0,765}$
9	27,4	-	330	$\frac{19,2}{0,662}$	$\frac{26,8}{0,731}$	$\frac{35,4}{0,761}$
10	22,3	1	360	$\frac{24,5}{0,711}$	$\frac{29,8}{0,789}$	$\frac{35,5}{0,827}$
11	29,5	-	590	$\frac{23,4}{0,670}$	$\frac{28,5}{0,743}$	$\frac{37,8}{0,765}$
12	22,5	1	630	$\frac{31,8}{0,737}$	$\frac{38,4}{0,824}$	$\frac{53,4}{0,852}$
13	28,1	-	320	$\frac{21,5}{0,659}$	$\frac{28,2}{0,730}$	$\frac{35,8}{0,771}$
14	22,7	1	350	$\frac{24,8}{0,714}$	$\frac{30,3}{0,796}$	$\frac{36,2}{0,841}$
15	31,4	-	620	$\frac{24,5}{0,657}$	$\frac{31,6}{0,732}$	$\frac{38,3}{0,760}$
16	23,1	1	630	$\frac{33,8}{0,737}$	$\frac{39,3}{0,831}$	$\frac{58,4}{0,864}$

З табл. 4.9 простежується взаємозв'язок міцності та відносної густини затверділих композиційних в'язучих, що узгоджується з теоретичними уявленнями, запропонованими для портландцементного каменю О.Є. Шейкіним. Певний внесок у величину відносної густини вносить як ступінь гідратації, так і В/Ц, що відповідає нормальній густоті, причому значення останньої стає визначальним для в'язучих, які містять пластифікатор як при звичайній, так і при підвищеній питомій поверхні.

4.3. Технологічні параметри отримання композиційних цементнопилошлакових в'язучих (ЦПШВ) низької водопотреби

Найбільший ефект при значному вмісті мінеральних добавок, у тому числі композиційного типу, досягається, як відомо [118], при отриманні в'язучих низької водопотреби (ВНВ), а також тонкомелених багатокомпонентних цементів (ТМЦ) і бетонів на їх основі. При отриманні ВНВ і ТМЦ максимально реалізується потенціал як клінкерної складової, так і мінеральних добавок, забезпечується їх спільний активуючий вплив на процеси гідратації та структуроутворення, синтез властивостей штучного каменю при мінімальному водовмісті, і як наслідок, мінімальній пористості.

Вплив складу та питомої поверхні ЦПШВ на їхню міцність

Міцнісні властивості ВНВ визначаються вмістом клінкеру, видом і вмістом мінеральної добавки та суперпластифікатора, що вводиться при помелі в'язучих, а також тонкістю помелу [118]. Потенціал ТМЦ реалізується повною мірою у бетонах та розчинах при введенні добавок-суперпластифікаторів з водою замішування.

Як показано раніше, додавання пилу-виносу клінкеровипалювальних печей до портландцементу доцільно в композиції з доменним гранульованим шлаком, який не тільки нівелює негативні особливості пилу як добавки до цементу

(підвищена водопотреба, вміст лугів та вільного вапна), а й активується під його впливом.

Для вивчення впливу вмісту та співвідношення основних компонентів, а також тонкості помелу на показники міцності ЦПШВ, були реалізовані алгоритмізовані відповідно до типового плану В₄ експерименти та отримані математичні моделі міцності на стиск та згин стандартних розчинів у віці 2, 7 і 28 діб.

Вихідними компонентами при реалізації експериментального плану В₄ були портландцемент І-го типу М500 та пил-виносу (табл. 4.1-4.2) клінкеровипалювальних печей (П₁) ВАТ «Волинь-цемент», а також доменний гранульований шлак Криворізького металургійного заводу. Як суперпластифікатор використовували добавки СП-1 і Sika VC225. Помел в'яжучих здійснювали в лабораторному млині. При помелі добавку суперпластифікатора вводили у порошкоподібному вигляді.

Умови планування експериментів наведено у табл.4.9, отримані експериментальні результати та експериментально-статистичні моделі у табл. 4.10, 4.11.

Таблиця 4.9

Умови планування експериментів при дослідженні впливу складу та питомої поверхні на міцність композиційних в'яжучих

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
(П ₁ +Ш), %	X ₁	10	35	60	25
$\frac{P_1}{P_1 + Ш}$	X ₂	0	0,5	1	0,5
S _{питг} , м ² /кг	X ₃	300	450	600	150
СП, %	X ₄	0	1	2	1

Примітка. П₁ – пил оберткових печей, Ш – доменний гранульований шлак, S_{питг} – питома поверхня, СП – суперпластифікатор СП-1.

Таблиця 4.10

Експериментальні результати, отримані при вивченні впливу складу ЦПШВ на їх міцнісні властивості

№ точки	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Міцність на стиск, МПа			Міцність на згин, МПа		
					2 доби	7 діб	28 діб	2 доби	7 діб	28 діб
1	1	1	1	1	9,4	21,7	30,1	1,88	3,62	3,77
2	1	1	1	-1	3,9	14,6	21,6	0,79	2,43	2,7
3	1	1	-1	1	6,7	14,0	20,1	1,34	2,33	2,51
4	1	1	-1	-1	2,8	9,3	14,8	0,55	1,55	1,85
5	1	-1	1	1	15,4	40,7	58,6	3,08	6,79	7,32
6	1	-1	1	-1	10,9	33,5	47,8	2,19	5,58	5,97
7	1	-1	-1	1	12,2	29,9	44,3	2,43	4,99	5,53
8	1	-1	-1	-1	9,2	25,1	36,7	1,85	4,19	4,59
9	-1	1	1	1	22,5	47,0	66,9	4,49	7,84	8,37
10	-1	1	1	-1	17,5	39,9	58,4	3,51	6,65	7,3
11	-1	1	-1	1	16,8	37,3	53,1	3,35	6,22	6,64
12	-1	1	-1	-1	13,4	32,6	47,8	2,67	5,44	5,98
13	-1	-1	1	1	24,9	50,2	72,1	4,99	8,36	9,02
14	-1	-1	1	-1	21,0	42,9	61,3	4,2	7,16	7,67
15	-1	-1	-1	1	18,7	37,4	54,1	3,74	6,23	6,76
16	-1	-1	-1	-1	16,3	32,6	46,5	3,26	5,43	5,81
17	1	0	0	0	16,9	35,2	49,8	3,39	5,87	6,22
18	-1	0	0	0	27,0	51,6	73,1	5,40	8,6	9,13
19	0	1	0	0	15,7	25,6	36,1	3,15	4,27	4,52
20	0	-1	0	0	20,2	35,1	49,7	4,04	5,85	6,21
21	0	0	1	0	19,3	39,1	55,1	3,86	6,51	6,89
22	0	0	-1	0	15,6	30,0	42,7	3,12	5,01	5,34
23	0	0	0	1	21,7	38,5	54,5	4,33	6,42	6,81
24	0	0	0	-1	17,8	32,6	46,4	3,55	5,43	5,8

Аналіз поліноміальних моделей (табл.4.11) отриманих в результаті обробки експериментальних даних дозволяє простежити чітко виражений нелінійний характер впливу досліджуваних факторів на міцність композиційних в'язучих і знайти їх оптимальні значення (рис.4.7, 4.8).

Таблиця 4.11

Математичні моделі міцнісних показників ЦПШВ

Міцнісні показники		Математичні моделі	
Границя міцності на стиск, МПа	2 доби	$y_1 = 21,09 - 5,04 X_1 - 2,24 X_2 + 1,85 X_3 + 1,96 X_4 + 0,88 X_1^2 - 3,12 X_2^2 - 3,62 X_3^2 - 1,38 X_4^2 - 0,88 X_1 X_2 - 0,75 X_1 X_3 + 0,13 X_2 X_3 + 0,25 X_2 X_4 + 0,38 X_3 X_4$	(4.15)
	7 діб	$y_2 = 37,35 - 8,19 X_1 - 4,74 X_2 + 4,52 X_3 + 2,98 X_4 + 6,04 X_1^2 - 7 X_2^2 - 2,8 X_3^2 - 1,8 X_4^2 - 3,97 X_1 X_2 - 0,5 X_1 X_3 - 0,78 X_2 X_3 - 0,03 X_2 X_4 + 0,61 X_3 X_4$	(4.16)
	28 діб	$y_3 = 52,6 - 11,65 X_1 - 6,78 X_2 + 6,22 X_3 + 4,03 X_4 + 8,82 X_1^2 - 9,68 X_2^2 - 3,68 X_3^2 - 2,18 X_4^2 - 5,81 X_1 X_2 - 0,94 X_1 X_3 - 1,06 X_2 X_3 - 0,56 X_2 X_4 + 0,81 X_3 X_4$	(4.17)
Границя міцності на згин, МПа	2 доби	$y_4 = 4,22 - 1,02 X_1 - 0,45 X_2 + 0,37 X_3 + 0,39 X_4 + 0,17 X_1^2 - 0,63 X_2^2 - 0,73 X_3^2 - 0,28 X_4^2 - 0,18 X_1 X_2 - 0,15 X_1 X_3 + 0,03 X_1 X_4 - 0,03 X_2 X_3 + 0,05 X_2 X_4 + 0,08 X_3 X_4$	(4.18)
	7 діб	$y_5 = 6,23 - 1,38 X_1 - 0,79 X_2 + 0,76 X_3 + 0,5 X_4 + 0,99 X_1^2 - 1,12 X_2^2 - 0,45 X_3^2 - 0,31 X_4^2 - 0,66 X_1 X_2 - 0,08 X_1 X_3 + 0,01 X_1 X_4 - 0,13 X_2 X_3 + 0,005 X_2 X_4 + 0,1 X_3 X_4$	(4.19)
	28 діб	$y_6 = 6,58 - 1,47 X_1 - 0,85 X_2 + 0,78 X_3 + 0,51 X_4 + 1,09 X_1^2 - 1,22 X_2^2 - 0,47 X_3^2 - 0,29 X_4^2 - 0,73 X_1 X_2 - 0,12 X_1 X_3 + 0,01 X_1 X_4 - 0,13 X_2 X_3 + 0,07 X_2 X_4 + 0,1 X_3 X_4$	(4.20)

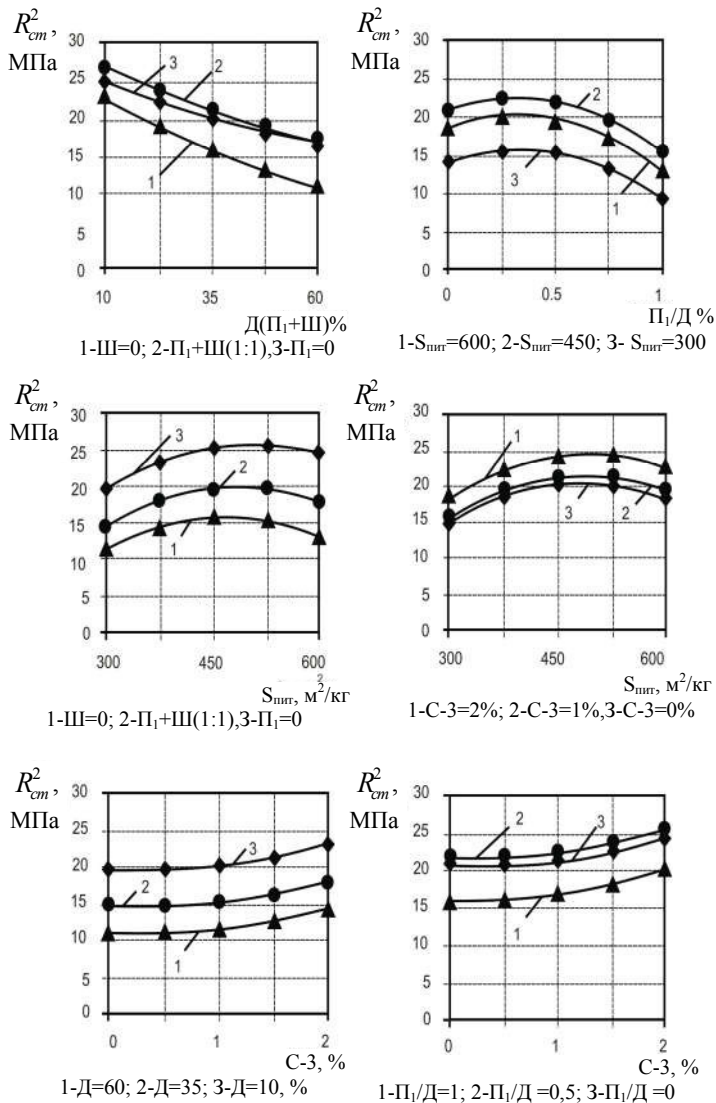


Рис.4.7. Залежність міцності на стиск композиційного цементношлакового в'язучого у віці 2 діб

Примітка: Фактори наведені в табл.4.9, вплив яких не розглядається на рис.4.7 знаходяться на основному (нульовому) рівні

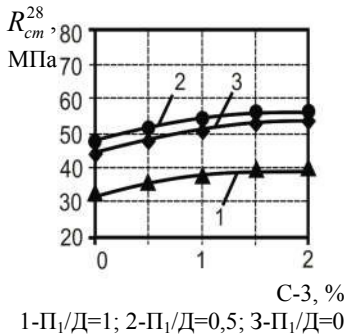
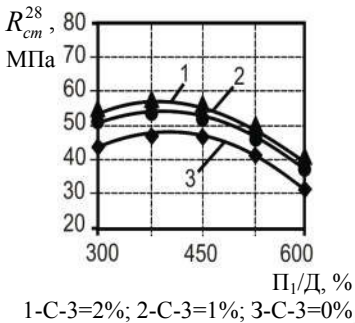
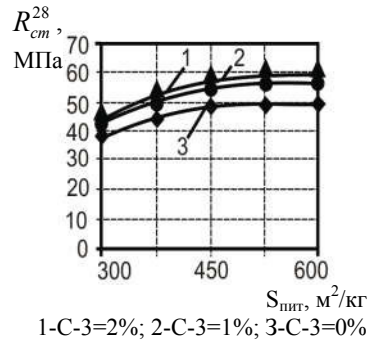
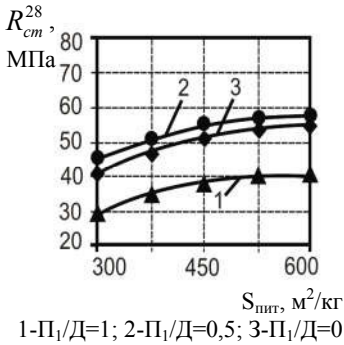
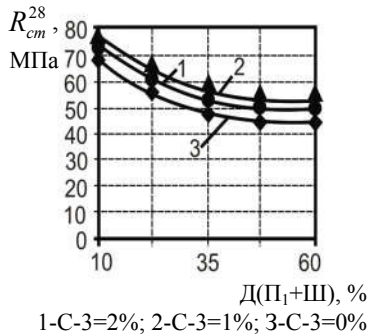
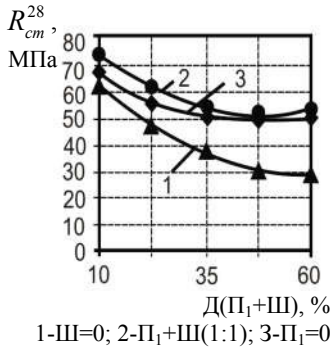


Рис.4.8. Залежність міцності на стиск композиційного в'язучого у віці 28 діб

Примітка: Фактори, наведені в табл.4.9, вплив яких не розглядається на рис.4.8 знаходяться на основному (нульовому) рівні

Вплив таких факторів як частка пилу-виносу в масі частини в'язучого та його питомої поверхні має екстремальний характер. Для питомої поверхні (рис.4.7, 4.8) він відчувається особливо у 2-добовому віці і у діапазоні 450-500 м²/кг. Інші автори [118, 176, 177] також відзначають зазначений діапазон питомої поверхні як оптимальний для ВНВ. Введення при помелі добавки суперпластифікатора не змінює характеру впливу питомої поверхні на міцність.

Спеціально виконані дослідження показали, що у вказаному діапазоні $S_{\text{пит}}$ при сприятливих значеннях інших факторів та вмісту СП СП-1 1...2% нормальна густота в'язучих становить 21...22% та 19...20% при введенні добавки "Sika VC225". Характерно, що величина нормальної густоти в'язучих із добавкою СП-1 зі збільшенням питомої поверхні практично не збільшується. Цей висновок можна пояснити тим, що в цементі з вищою питомою поверхнею деяке збільшення водопотреби компенсується вищою адсорбційною і, відповідно, водоутримуючою активністю добавки суперпластифікатора.

Збільшення вмісту пилошлакового наповнювача по-різному позначається на міцності в'язучих залежно від тривалості твердіння та співвідношення пилу та шлаку (рис.4.7, 4.8). У ранньому віці збільшення вмісту пилу у складі в'язучого практично лінійно знижує його міцність. Менше, хоч і значною мірою, знижується міцність при введенні доменного шлаку та комбінації шлаку та пилу. При цьому при комбінуванні шлаку та пилу у співвідношенні 1:1 за масою зниження міцності відбувається приблизно так само, як при введенні лише одного шлаку. У 28-добовому віці збільшення вмісту пилу у складі в'язучого від 10 до 30% знижує міцність при стиску на 35%, а до 50% – практично вдвічі. Різке падіння міцності цементу, наповненого пилом, значною мірою пояснюється збільшенням його водопотреби (табл.4.12). Збільшення вмісту пилошлакового наповнювача у співвідношенні пил:шлак 1:1 за масою як і одного шлаку від 10 до 50% спричиняє зниження міцності приблизно лише на 30% (рис.4.7, 4.8). Збільшення частки пилу в пилошлаковому наповнювачі від 0 до 50% практично не спричиняє додаткового зниження міцності.

Таблиця 4.12

Водопотреба композиційних в'язучих та розчинів

№ з/п	Склад в'язучого, %				S _{пит.} , м ² /кг	Норм. густота, %	Водо-в'язуче відношення розчину (РК=115 мм)
	Цемент	Шлак	Пил	Суперпластифікатор СП-1			
1	65	-	35	-	310	32,3	0,41
2	40	-	60	-	310	36,5	0,43
3	65	-	35	1	320	28,3	0,40
4	65	-	35	2	320	27,8	0,40
5	65	35	-	-	310	27,1	0,40
6	40	60	-	-	310	28,2	0,40
7	40	60	-	1	325	22,2	0,37
8	40	60	-	2	325	21,4	0,36
9	50	25	25	-	320	29,1	0,41
10	50	25	25	1	330	22,7	0,36
11	50	25	25	2	330	21,6	0,35
12	50	25	25	1	460	21,7	0,35
13	50	25	25	1	580	22,1	0,36
14	50	25	25	0,6*	450	19,5	0,33
15	50	25	25	0,6*	590	19,8	0,33

Примітки. 1. У в'язуче складів №14 і 15 вводили при помелі суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Sika VC 225. 2. Гіпс і суперпластифікатор, що вводяться в цемент, обліковуються понад 100%.

Зниження водопотреби в'язучих за рахунок введення добавки суперпластифікатора та підвищення питомої поверхні дозволяє суттєво збільшити їхню міцність. Домол цементу із вмістом пилу-виносу 50-60% та добавкою СП-1 до питомої поверхні 450-500 м²/кг дозволяє збільшити міцність при стиску з 30 до 40 МПа. При вмісті комплексної добавки цементний пил-домений шлак 50-60% у співвідношенні 1:1 за масою за тих же умов можливе отримання в'язучого з міцністю при стиску у віці 28 діб 50-60 МПа (табл.4.10, рис.4.7, 4.8).

Заміна нафталінформальдегідного суперпластифікатора полікарбоксилатним дозволяє при вмісті комплексного

пилошлакового активного наповнювача 50% підвищити марочну міцність композиційного в'язучого до 70 МПа (табл.4.13).

Таблиця 4.13

Міцність композиційних в'язучих з добавкою суперпластифікатора Sika VC 225

№ з/п	Склад в'язучого, %				$S_{\text{плт}}$, м ² /кг	Міцність, МПа					
	Цемент	Шлак	Пил	СП Sika		згин, діб			стиск, діб		
						2	7	28	2	7	28
1	50	25	25	0,3	320	3,8	4,7	5,6	28	36	42
2	50	25	25	0,3	450	4,7	5,8	6,5	31	44	58
3	50	25	25	0,3	580	5,1	6,3	7,1	39	51	64
4	50	25	25	0,6	320	4,8	5,7	6,4	35	43	56
5	50	25	25	0,6	450	5,9	6,8	7,5	49	61	72
6	50	25	25	0,6	580	6,2	7,1	7,9	51	63	75
7	50	25	25	0,7	450	6,0	6,9	7,7	50	62	73

Примітка. Гіпс та суперпластифікатор, що вводяться в цемент, врівноважуються понад 100%.

Отримані композиційні в'язучі низької водопотреби є швидкотверднучими, їх 2-добова міцність становить не менше 50% 28-добової, а відношення міцності при стиску до міцності при згині для оптимальних складів знаходиться у звичайних межах, характерних для портландцементу

Враховуючи можливість коливання в пилу вмісту лужних сполук і вільного вапна визначали їх вплив на показники міцності ЦПШВ низької водопотреби, що містять пил і доменний гранульований шлак в оптимальному співвідношенні. З цією метою були поставлені додаткові дослід з використанням пилу П2, що містить підвищену кількість лужних оксидів (5,6%) та вільного вапна (5,9%). До складу в'язучого входило 60% пилу та шлаку у співвідношенні 1:1. Результати дослідів наведено у табл. 4.14.

Як випливає з даних, наведених у табл.4.14 деяке збільшення вмісту в пилу R_2O і CaO_v викликає невелику тенденцію до збільшення показників міцності композиційних в'язучих низької водопотреби, що пов'язано з додатковою активізацією шлакового компонента.

Таблиця 4.14

Вплив вмісту лугів R_2O і вільного вапна CaO_B в пилу-виносу на міцність ЦПШВ

Проба пилу	Вміст СП	Питома поверхня m^2/kg	Міцність, МПа					
			згин, діб			стиск, діб		
			2	7	28	2	7	28
П ₁ -1 ($R_2O=2,9$, $CaO_B=3,1\%$)	СП-1-1%	450	3,4	5,9	6,2	16,9	35,2	49,8
	СП-1-2%	450	3,5	6,1	6,5	17,6	36,4	51,6
	Sika-0,6%	450	5,9	6,8	7,5	49,0	61,0	72,0
П ₁ -2 ($R_2O=5,6$, $CaO_B=5,9\%$)	СП-1-1%	450	3,6	6,5	6,9	18,6	39,4	53,3
	СП-1-2%	450	3,8	6,7	7,1	19,6	39,7	55,7
	Sika -0,6%	450	6,3	7,2	7,8	51,0	63,0	74,0

Технологічною проблемою отримання ВНВ є досягнення високої питомої поверхні в'язучого. Поряд із застосуванням для тонкого помелу в промислових умовах сепараторних кульових млинів, інших спеціальних видів млинів представляє практичний інтерес використання для цієї мети добавок-інтенсифікаторів помелу. У роботі [183] було показано, що одночасно модифікатором властивостей в'язучого і бетонів та інтенсифікатором помелу може бути суперпластифікатор СП-1. При однаковій вихідній дисперсності частинок тривалість помелу клінкеру з оптимальною кількістю гіпсу та добавкою СП-1 до досягнення питомої поверхні в'язучого $440 m^2/kg$ скоротилася вдвічі порівняно з тривалістю помелу клінкеру без суперпластифікатора. Відзначено також, що добавка СП-1 полегшує досягнення високої питомої поверхні в'язучого, запобігаючи його агрегуванню при помелі. Фізико-хімічні аспекти процесів, що відбуваються при спільному помелі клінкеру та суперпластифікатора, розглянуті в ряді робіт [118, 178, 179].

При отриманні ВНВ з використанням пилу-виносу раціональним є його спільний домел з товарним портландцементом II-го типу або шлакопортландцементом. Можливий також спільний домел трьох компонентів: портландцементу, меленого шлаку та пилу. В даний час розроблені промислові технологічні лінії для отримання ВНВ шляхом домелу цементу та інших мінеральних компонентів до необхідної питомої поверхні із застосуванням кульових та вібраційних млинів. Останні створюють найкращі умови для досягнення високої питомої поверхні в'язучих та їхньої механо-хімічної активації [179].

При тонкому помелі порошоків як у кульових, так і вібраційних млинах актуальним є запобігання налипанню на тіла, що мелють, дрібних частинок і їх агрегуванню.

Вивчали в лабораторних кульовому та вібраційному млинах кінетику подрібнення композиційних ЦПШВ, для отримання яких використовували портландцемент I-го типу ($S_{\text{пит}}=310 \text{ м}^2/\text{кг}$), мелений доменний шлак ($S_{\text{пит}}=240 \text{ м}^2/\text{кг}$), пил-виносу ($S_{\text{пит}}=390 \text{ м}^2/\text{кг}$). При помелі вводили добавки СП-1, Sika, а також Пропіленгліколь. Результати дослідів наведено на рис. 4.9, 4.10. З них випливає, що при подрібненні в лабораторному кульовому млині після досягнення питомої поверхні близько $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ подальше збільшення тривалості помелу призводить до зменшення величини $S_{\text{пит}}$ внаслідок агрегації тонких частинок. Додавання СП-1 інтенсифікує помел, дозволяючи досягти через 3 години $S_{\text{пит}}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$. При цьому зі збільшенням тривалості помелу ефект інтенсифікації помелу відчутний більшою мірою, хоча вже через 2 години подрібнення зростання питомої поверхні в'язучого сповільнюється.

Ще більшою мірою відчутна інтенсифікація помелу при введенні пропіленгліколю, а також композиції пропіленгліколю та СП-1. Як відомо, пропіленгліколі, що є представниками групи гліколів, як і ПАР групи амінів належать до сильних інтенсифікаторів помелу в діапазоні концентрацій 0,03-0,1% від маси в'язучого.

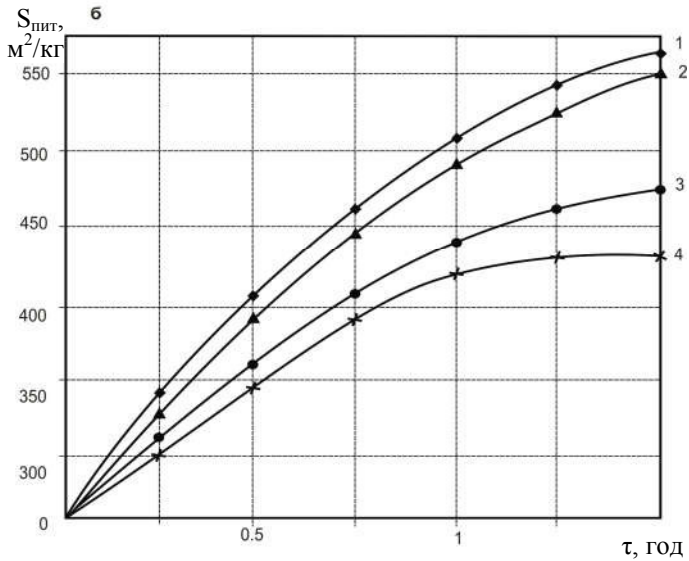
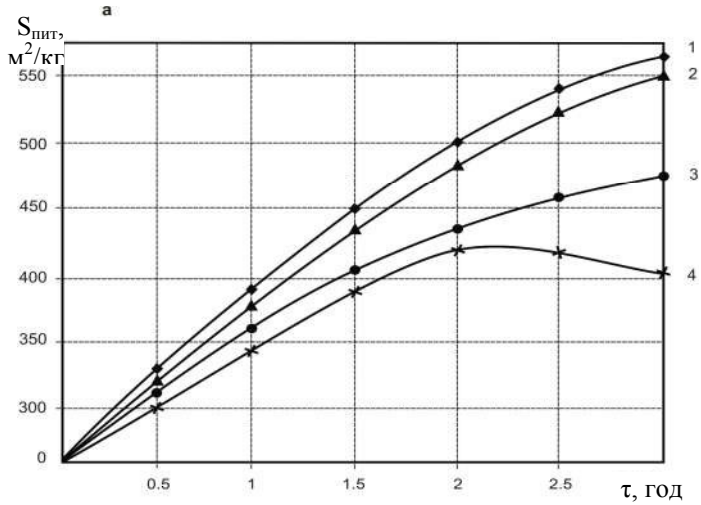


Рис. 4.9. Кінетика подрібнення ЦПШВ з добавками Sika та пропіленгліколю:
а – у кульовому млині; **б** – у вібромлині
 1 – 0,04% пропіленгліколю + 0,6% Sika; 2 – 0,04% пропіленгліколю;
 3 – 0,6% Sika; 4 – без добавок

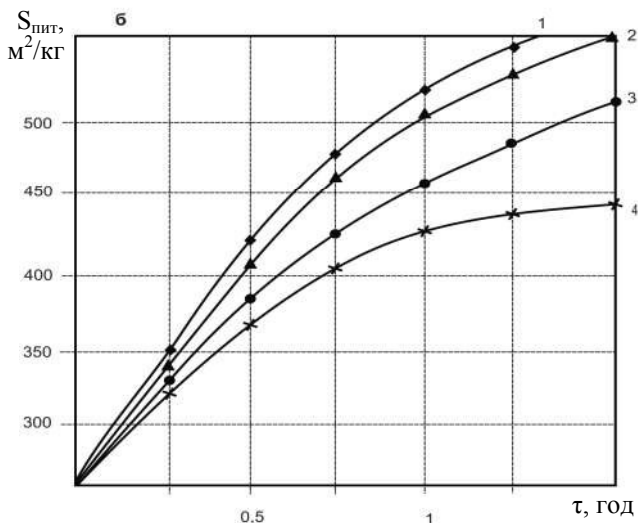
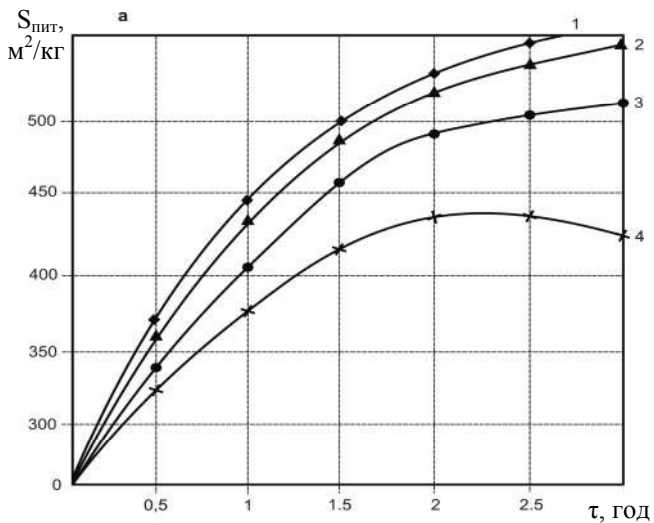


Рис. 4.10. Кінетика подрібнення ЦПШВ з добавками СП-1 та пропіленгліколю:

а – у кульовому млині; **б** – у вібромлині

1 – 0,04% пропіленгліколю + 1 % СП-1; 2 – 0,04% пропіленгліколю;
3 – 1 % СП-1; 4 – без добавок

Помел у вібромліні дозволив приблизно в 2 рази швидше отримувати в'язучі з питомою поверхнею аналогічної поверхні, що досягається в кульовому млині. Введення добавок СП-1 і пропіленгліколю при помелі у вібромліні, як і в кульовому, призводить до суттєвого інтенсифікуючого ефекту.

Ефект добавки Sika як інтенсифікатора помелу виявився при помелі в кульовому та у вібромліні менше ніж СП-1. Збільшення вмісту у в'язучому зазначених добавок більше відповідно 1% і 0,6% не спричинило помітного посилення їх дії як інтенсифікаторів помелу.

Як впливає з отриманих експериментальних даних, в обох випадках при близькій питомій поверхні в'язучі з добавкою пропіленгліколю в межах 0,03-0,04% за масою мають практично таку ж міцність як і без цієї добавки (табл.4.15). Подальше збільшення кількості пропіленгліколю призводить до деякого зниження міцності, особливо в ранні терміни твердіння, що можна пояснити адсорбційним ефектом стабілізації процесів гідратації [180,181].

Таблиця 4.15

Вплив добавки пропіленгліколю на міцнісні характеристики ЦПШВ

№ з/п	S _{пит.} , м ² /кг	Вміст добавки суперплас-тифікатора,%	Вміст добавки пропілен-гліколю,%	Міцність, МПа					
				згин, діб			стиск, діб		
				2	7	28	2	7	28
1	430-450	СП-1 - 1,5%	-	4,8	5,7	6,6	33	54	61
			0,03	4,4	5,9	6,3	34	51	63
			0,04	4,3	5,1	6,5	32	51	61
			0,05	3,6	4,4	5,9	28	46	59
2	430-450	Sika - 0,6%	-	5,7	6,5	7,3	47	59	71
			0,03	5,7	6,1	7,5	46	58	72
			0,04	5,5	6,1	7,1	45	57	70
			0,05	4,6	5,5	6,8	39	55	66
3	430-450	-	-	3,4	4,1	5,4	25	37	45
			0,03	3,5	3,9	5,2	24	35	44
			0,04	3,2	3,7	5,1	23	35	43
			0,05	2,8	3,2	4,6	19	32	41

Примітка: Склад в'язучого: портландцемент I-го типу М-500 – 50%, шлак доменний – 25%, пил-виносу – 25%.

4.4. Сухі будівельні суміші та розчини на основі композиційних цементнопилошлакових в'язучих

Досліджували властивості сухих будівельних сумішей і розчинів, призначених для мурувальних робіт, з використанням ЦПШВ, що містять портландцемент, пил-виносу клінкеровипалювальних обертових печей і доменний гранульований шлак.

У практиці сучасного будівництва найбільше застосування для мурувальних робіт знайшли цементно-вапняні розчини марок М50-М100 [119]. Актуальними для будівництва з позицій ресурсо- та енергоємності будівельних мурувальних розчинів є проблеми зниження витрати цементу та відмова від використання вапна за рахунок застосування добавок ПАР та техногенної мінеральної сировини.

Вплив складу сухих сумішей, що містять пил-виносу, на властивості будівельних розчинів

Сухі будівельні суміші виготовляли ретельним змішуванням в лабораторному змішувачі портландцементу, пилу-виносу, меленого гранульованого доменного шлаку та піску з введенням порошкоподібної добавки суперпластифікатора СП-1. Шлак подрібнювали до питомої поверхні $S_{\text{пит}}=310-330 \text{ м}^2/\text{кг}$ у лабораторному кульовому млині. Пил-виносу відповідав за хімічним складом пилу П1, наведеному в табл.4.1. Для досягнення необхідної однорідності сумішей здійснювали їхнє двоетапне змішування: на першому етапі – компонентів в'язучого, на другому – із введенням піску.

Для визначення впливу складу сухих сумішей на нормовані властивості розчинів виконали експерименти, алгоритмізовані відповідно до типового плану напіврепліки повнофакторного експерименту при варіюванні чотирьох факторів [168]. Умови планування експериментів наведено у табл.4.16.

Таблиця 4.16

Умови планування експериментів щодо впливу складу сухих сумішей на властивості розчинів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Витрата цементу (Ц), кг/т	X_1	100	150	200	50
Витрата шлаку (Ш), кг/т	X_2	50	75	100	25
Витрата пилу (P_v), кг/т	X_3	50	75	100	25
Витрата суперпластифікатора (СП-1), % від маси в'язучого	X_4	0	0,5	1	0,5

Витрату кварцового піску у кожній точці матриці визначали з умови: $P_k=1000$ -Ц-Ш-П₁. Пісок використовували дрібний з максимальною крупністю 1,25 мм ($M_k=1,3$). Будівельні суміші в кожній точці матриці отримували замішуванням сухої суміші при доведенні до рухомості 8...10 см занурення стандартного конуса.

Як вихідні параметри визначали границю міцності розчинів на стиск для зразків, що твердіють у повітряно-сухих умовах, міцність зчеплення з основою, морозостійкість. Склади досліджуваних сумішей та результати дослідів щодо визначення властивостей розчинів на їх основі наведено в табл.4.17.

Таблиця 4.17

Склади сухих сумішей і властивості розчинів на їх основі

№	Склад сухої суміші, кг/т				Коефіцієнт виходу розчину (K _в), л/кг	В'язуче-водне відношення (В'яз/В)	Границя міцності на стиск, МПа		Міцність зчеплення з основою, МПа (R _{зч})	Морозостійкість, цикли (F)
	Цемент (Ц)	Шлак (Ш)	Пил (П ₁)	Пісок (П _к)			7 діб (R _{см} ⁷)	28 діб (R _{см} ²⁸)		
1*	200	100	100	600	0,7	2,94	21,8	27,6	0,82	100
2	200	100	50	650	0,5	2,33	17,4	23,5	0,61	75
3	200	50	100	650	0,5	2,27	8,5	14,2	0,45	50
4*	200	50	50	700	0,65	2,63	21,0	30,0	0,74	75
5	100	100	100	700	0,6	1,92	7,1	13,5	0,43	35
6*	100	100	50	750	0,65	2,08	6,7	13,8	0,34	50
7*	100	50	100	750	0,65	2,5	8,1	15,4	0,51	50
8	100	50	50	800	0,55	1,35	3,4	7,4	0,25	25

* У суміші складів 1, 4, 6, 7 вводили суперпластифікатор СП-1 у кількості відповідно 4; 3; 2,5; 2,5 кг/т.

Додатково знаходили також коефіцієнт виходу розчинової суміші (л/кг) і в'язучо-водне відношення, необхідне для досягнення заданої рухомості розчинної суміші. В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримані неповні квадратичні рівняння регресії досліджуваних параметрів від факторів, що варіюються, наведені в кодованих змінних в табл.4.18. Поряд з лінійними ефектами впливу окремих факторів рівняння (4.19...4.24) враховують і ефекти їхньої парної взаємодії.

Таблиця 4.18

Математичні моделі властивостей розчинів на основі сухих сумішей

Властивості розчину	Вихідний параметр	Рівняння регресії
Міцність при стиску у віці 7 діб (МПа)	R_{cm_7}	$R_{cm_7} = 11,8 + 5,43X_1 + 1,5X_2 - 0,38X_3 + 2,65X_4 + 0,93X_1X_2 - 1,65X_1X_3 + 1,58X_1X_4 + 1,58X_2X_3 - 1,65X_2X_4 + 0,92X_3X_4$ (4.21)
Міцність при стиску у віці 28 діб (МПа)	$R_{cm_{28}}$	$R_{cm_{28}} = 18,0 + 5,81X_1 + 1,59X_2 - 0,3X_3 + 3,69X_4 + 0,14X_1X_2 - 2,6X_1X_3 + 1,29X_1X_4 + 1,29X_2X_3 - 2,6X_2X_4 + 0,14X_3X_4$ (4.22)
Міцність зчеплення у віці 28 діб (МПа)	R_{ad}	$R_{ad} = 0,52 + 0,14X_1 + 0,03X_2 - 0,03X_3 + 0,08X_4 + 0,03X_1X_2 - 0,05X_1X_3 + 0,04X_1X_4 + 0,04X_2X_3 - 0,5X_2X_4 + 0,14X_3X_4$ (4.23)
Морозостійкість, цикли	F	$F = 57,5 + 17,5X_1 + 7,5X_2 + 1,25X_3 + 11,25X_4 + 5X_1X_2 - 1,25X_1X_3 + 1,25X_1X_4 + 1,3X_2X_3 - 1,3X_2X_4 + 5X_3X_4$ (4.24)
В'язуче-водне відношення	$B'_{яз}/B$	$B'_{яз}/B = 2,25 + 0,29X_1 + 0,06X_2 + 0,15X_3 + 0,28X_4 + 0,028X_1X_2 - 0,09X_1X_3 - 0,04X_1X_4 - 0,04X_2X_3 - 0,09X_2X_4 + 0,028X_3X_4$ (4.25)
Коефіцієнт виходу розчинової суміші	K_e	$K_e = 0,606 + 0,06X_1 + 0,031X_2 + 0,006X_3 + 0,031X_4 + 0,006X_1X_2 + 0,006X_1X_3 + 0,007X_1X_4 + 0,005X_2X_3 + 0,007X_2X_4 + 0,006X_3X_4$ (4.26)

Аналіз рівнянь, що описують вплив факторів складу сухих сумішей на міцність розчинів при стиску, показує (рис.4.11, 4.12), що у досліджуваному діапазоні зміни факторів складу можливе одержання розчинів із 28-добовою міцністю при стиску 10...30 МПа. До 7-добового віку міцність розчинів досягає 70% марочної 28-добової міцності. Міцність закономірно знижується при зміні складів сумішей, що призводять до зменшення в'язучо-водного відношення. У цьому плані особливо суттєво відчувається вплив витрати цементу та добавки суперпластифікатора.

У рівняннях регресії як 7-и, так і 28-добової міцності найбільш значні лінійні ефекти виявляються для факторів X_1 і X_4 , тобто витрати цементу і суперпластифікатора. Збільшення вмісту шлаку у складі суміші може спричинити як деяке збільшення, так і зниження 28-добової міцності розчинів. Зростання міцності розчинів зі збільшенням вмісту шлаку характерне для зниженого вмісту цементу (рис.4.11, 4.12) і, навпаки, у сумішах, що містять підвищену витрату цементу, зі збільшенням вмісту шлаку спостерігається зниження міцності.

Зниження вмісту пилу у вибраних межах також може знижувати або практично не впливати або збільшувати міцність. Деяке збільшення міцності розчинів зі збільшенням вмісту пилу-виносу спостерігається при одночасному збільшенні вмісту шлаку. При недостатньому вмісті шлаку в розчинових сумішах збільшення вмісту пилу призводить до зниження міцності. Зниження міцності можливе також за відсутності в розчиновій суміші добавки суперпластифікатора (рис.4.11, 4.12).

У порівняно малоцементних розчинах спільне введення шлаку та пилу в якості активних мінеральних наповнювачів у кількості до 200 кг/м³ кожного призводить до відчутного збільшення як 7-и, так і 28-добової міцності на стиск.

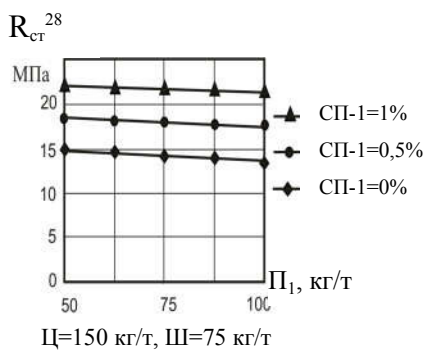
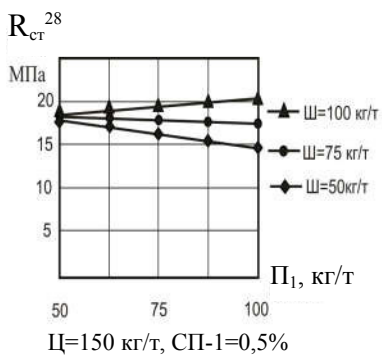
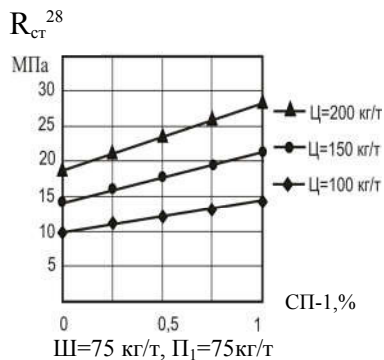
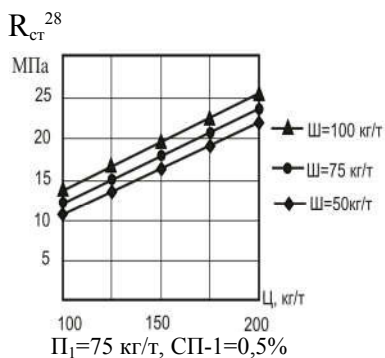
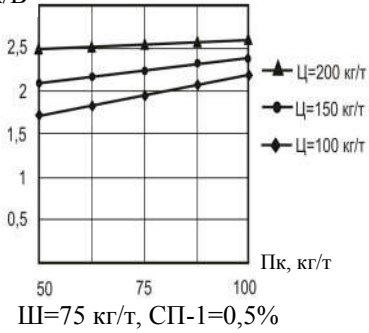


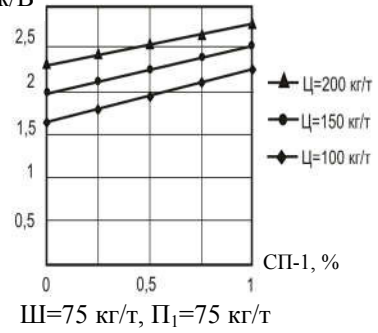
Рис. 4.11. Вплив складу сухої суміші на міцність розчинів на стиск у віці 28 діб

Вплив складу сухої суміші на в'язуче-водне відношення та коефіцієнт виходу розчину наведено на рис.4.12., 4.13.

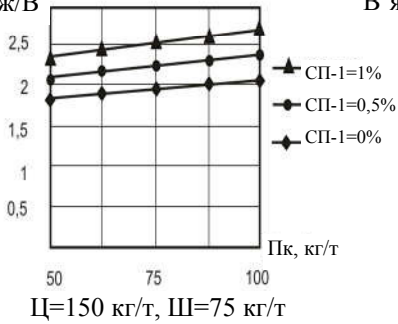
В'яз/В



В'яз/В



В'яз/В



В'яз/В

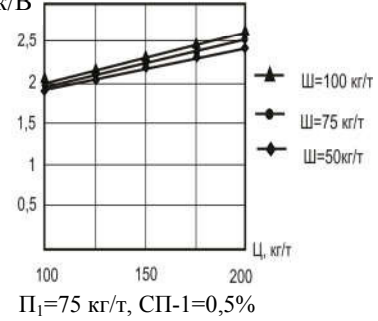


Рис. 4.12. Вплив складу сухої суміші на в'язуче-водне відношення

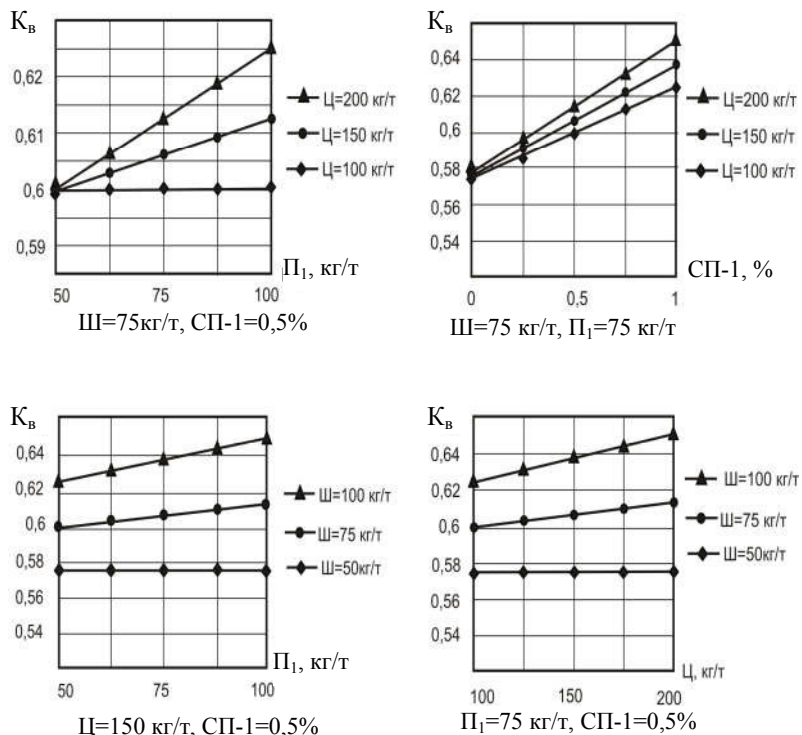


Рис. 4.13. Вплив складу сухої суміші на коефіцієнт виходу розчину

Експериментально-статистичні моделі можуть бути використані для проектування складів як сухих сумішей, так і розчинів на їх основі. Склад сумішей, що забезпечують задану міцність, легко підібрати методом перебору з використанням рівнянь (4.21, 4.22) та з урахуванням можливих обмежень на ресурси. З цією метою можливе використання номограми (рис.4.14).

Для забезпечення комплексу необхідних властивостей, наприклад, 28-добової міцності при стиску, міцності зчеплення з основою та морозостійкості розв'язується система трьох

відповідних рівнянь (витрата суперпластифікатора X_4 задається) і знаходяться необхідні витрати (кг/т) цементу, шлаку і пилу (X_1 , X_2 та X_3).

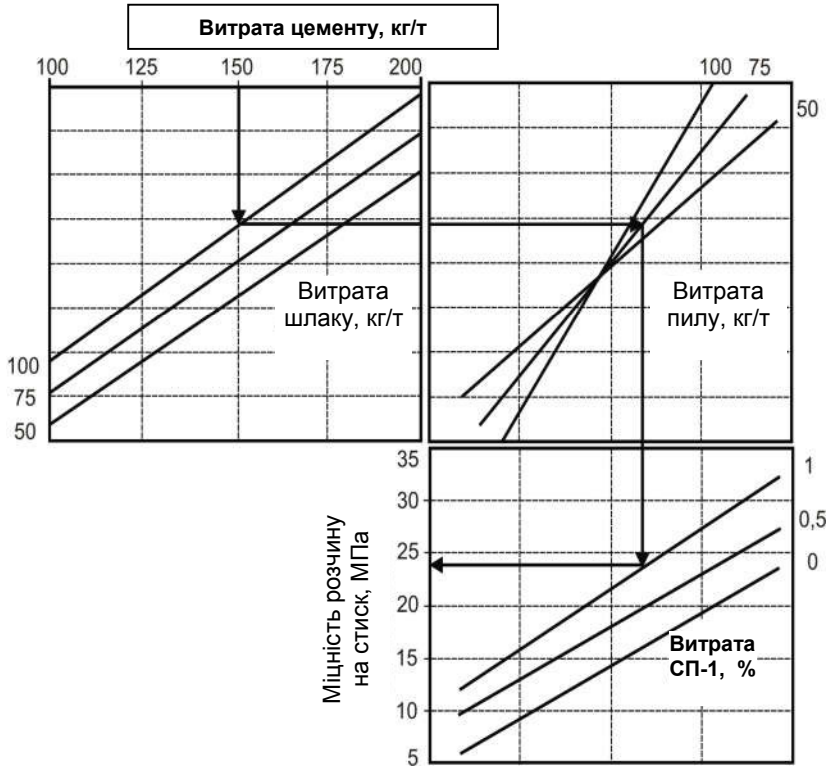


Рис.4.14. Номограма для розрахунку складу сухої будівельної суміші для отримання мурувального розчину

При переході від складу сухої суміші (кг/т) до складу розчину розрахунковим шляхом з використанням відповідного рівняння (4.27) регресії знаходимо величину коефіцієнта виходу та перераховуємо витрати кожного компонента:

$$P_{P.C.} = \frac{P_{C.C.}}{K_B}, \quad (4.27)$$

де $P_{P.C.}$ – витрата компонентів розчинової суміші, кг/м³;

$P_{C.C.}$ – витрата компоненту сухої суміші, кг/т;

K_B – коефіцієнт виходу, м³/т.

При необхідності можливий аналіз розрахункових складів, що забезпечують мінімальну вартість суміші:

$$C_M = C_{ц}Ц + C_{ш}Ш + C_{п}П + C_{пк}Пк + C_{сн}Сн, \quad (4.26)$$

де C_M – загальна вартість матеріалів на 1 т сухої суміші або 1 м³ розчинової суміші;

$C_{ц}$, $C_{ш}$, $C_{п}$, $C_{пк}$, $C_{сн}$ – вартості цементу, доменного шлаку, пилу-виносу, піску та суперпластифікатора;

$Ц$, $Ш$, $П$, $Пк$, $Сн$ – питомі витрати відповідних компонентів.

У табл. 4.19 наведено склади сухих сумішей різних марок за міцністю, розраховані за допомогою рівнянь, що забезпечують мінімально можливу витрату цементу з урахуванням прийнятої в табл.4.16 області варіювання факторів.

Таблиця 4.19

Розрахункові склади сухих сумішей і розчинів

№ склади	Марка розчину за міцністю	Состав сухой смеси					Коефіцієнт виходу	В'язуче/водне відношення
		Цемент, кг/т	Шлак, кг/т	Пил, кг/т	Пісок, кг/т	Суперпластифікатор СП-1, %		
1	50	100	75	50	775	0	0,53	1,43
2	75	100	75	50	775	0,3	0,54	1,60
3	100	200	75	50	675	0,5	0,65	2,48
4	150	200	50	100	650	1	0,67	2,91
5	200	105	100	100	695	1	0,62	2,47
6	250	140	100	50	710	1	0,64	2,29

На рис.4.15 наведено розрахункові залежності, що характеризують взаємозв'язок міцності розчинів з в'яжуче-водним відношенням.

Залежності $R_p = f(B'яж/В)$ можна інтерпретувати формулами типу:

$$R_p = K(B'яж/В - b), \quad (4.28)$$

де K і b – коефіцієнти, що враховують особливості використаних матеріалів. Для використаних матеріалів у віці твердіння розчинів 7 діб $K=12,7$, $b=1,32$; 28 діб – $K=15$, $b=1,05$.

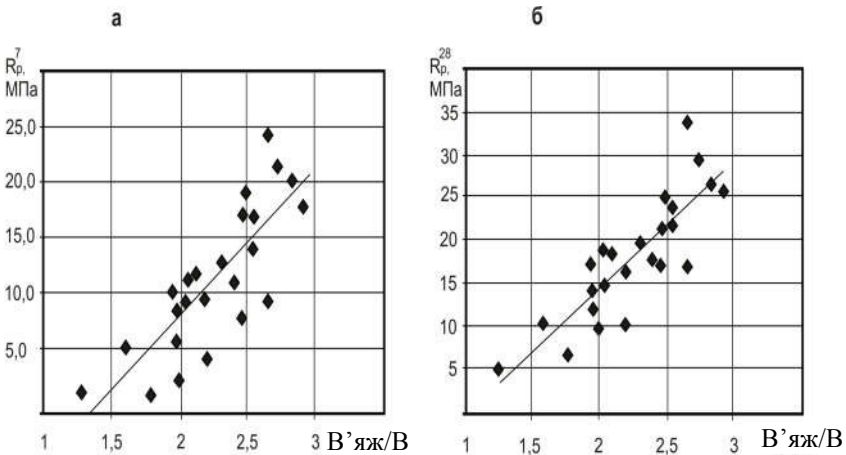


Рис. 4.15. Взаємозв'язок міцності розчинів із в'яжуче-водним відношенням у віці: а – 7 діб; б – 28 діб

Коефіцієнт K повинен відображати певною мірою також вплив активності використаних в'яжучих. При врахуванні впливу активності в'яжучих формула (4.28) матиме вигляд:

$$R_p = AR_{e'яж} (B'яж/В - b). \quad (4.29)$$

Розрахункові та експериментальні значення міцності розчинів, обчислені за формулою (4.28) наведено в табл. 4.20.

Важливим показником якості мурувальних розчинів є міцність зчеплення з основою, що вимірюється міцністю на відрив,

яка визначається їх когезійними і адгезійними властивостями. Основним когезійним параметром розчину є його міцність при стиску. Адгезія цементних розчинів до основ перебуває у складній залежності від багатьох факторів у т.ч. дисперсності в'язучого, змочуваності основи розчиноюю сумішшю та ін. [118].

Таблиця 4.20

Розрахункові та експериментальні значення міцності розчинів

Номер складу за табл.4.19	Розрахункові значення 28-добової міцності на стиск, МПа	Експериментальні значення 28-добової міцності на стиск, МПа	Відносна похибка, %
1	5,7	6,3	10
2	8,3	7,7	15
3	21,5	24,1	12
4	27,9	25,4	9
5	21,3	23,6	11
6	18,6	16,7	11

Основна роль у формуванні адгезійної міцності приділяється співвідношенню значень поверхневої енергії адгезиву ($W_{ад}$) та субстрату ($W_{суб}$). При цьому обов'язковою є умова $W_{ад} < W_{суб}$. Величина поверхневої енергії є складовою повної енергії речовин, яка визначається особливостями їх структури, хімічного складу, дисперсності та ін.

Змочуванню розчином основи та підвищенню адгезійної міцності сприяє зменшення поверхневої енергії при створенні адсорбційно-активного середовища за рахунок добавок ПАР [29].

Вплив адсорбційно-активного середовища зростає з підвищенням дисперсності наповнювача та його концентрації, що пов'язано із збільшенням міжфазної поверхні та, відповідно, з поверхневою енергією.

Міцність зчеплення розчинів на композиційних в'язучих, що включають пил-виносу та доменний гранульований шлак для всіх складів у дослідженій області зміни факторів перевищує нормативні вимоги. Вона суттєво зростає зі збільшенням об'єму в'язучої складової в сухих сумішах (рис.4.16). Позитивно також

впливає зменшення водов'язучого відношення. Крім того, добавка суперпластифікатора, що відноситься до гідрофільних ПАР, повинна сприяти поліпшенню змочування поверхні основи та збільшення адгезійної міцності.

Додавання пилу-виносу в розчинову суміш позитивно впливає на міцність зчеплення. Ступінь її впливу зі збільшенням питомого вмісту в розчиновій суміші зростає при одночасному збільшенні вмісту шлаку та зменшенні вмісту цементу (рис.4.16). Цей результат можна пояснити поліпшенням в'язучих властивостей композиції пил-шлак при досягненні оптимального співвідношення компонентів. При цьому вплив цементно-пилошлакового в'язучого на зчеплення розчину з основою стає особливо значним при нестачі цементного тіста (рис.4.16).

Позитивний вплив пилу як високодисперсного компонента сухої суміші, що збільшує її водопотребу, на міцність зчеплення зростає при введенні добавки суперпластифікатора, яка зменшує негативний вплив пилу на водовміст. Посилення позитивного впливу пилу на міцність зчеплення розчину з основою відображається наявністю у відповідному рівнянні регресії (табл.4.18) найбільш значного ефекту взаємодії факторів X_3 і X_4 .

Позитивному впливу пилу на адгезійні властивості розчинових сумішей сприяє його хімічний склад. За даними В.М. Вирового [29] найбільшу величину адгезії і відповідно силу зчеплення мають суміші, що складаються з цементу та вапняку (у пилу переважають зерна вапняку), найменшу – кварцового піску.

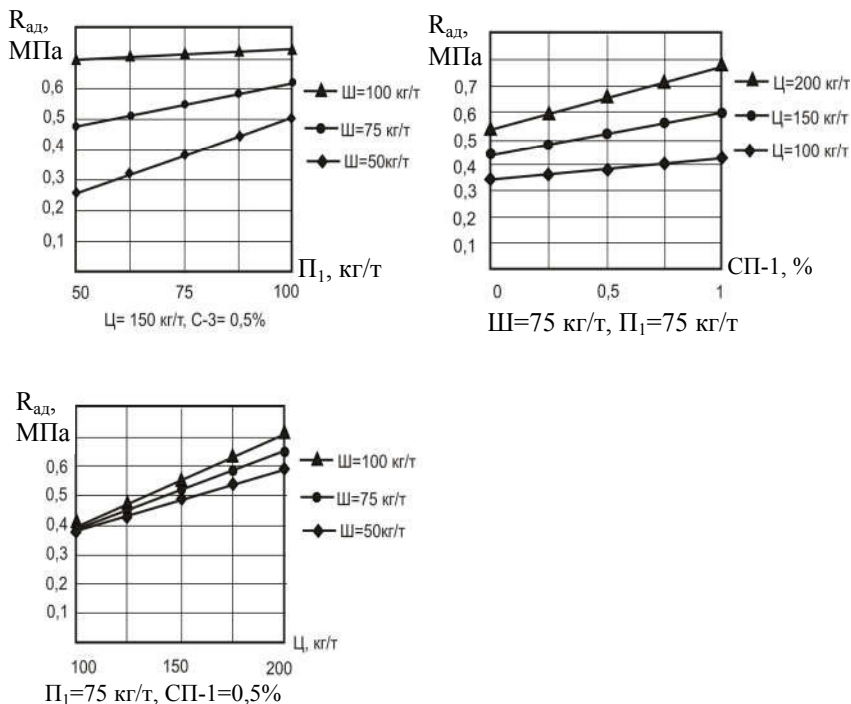


Рис. 4.16. Вплив складу сухої суміші на міцність зчеплення розчинів із основою

Морозостійкість розчинів на композиційних в'язучих, як випливає з аналізу рівнянь регресії (табл.4.18) знаходиться в області значень, що допускаються для мурувальних розчинів і, в основному, визначається факторами, що впливають на в'язуче-водне відношення, тобто витратою цементу і вмістом добавки суперпластифікатора (рис.4.17). Вплив добавки пилу на морозостійкість бетону залежить від того, наскільки при його введенні змінюється водовміст і, відповідно, водов'язуче відношення. Якщо в суміші відсутня добавка суперпластифікатора, введення підвищеного вмісту пилу-виносу призводить до зменшення морозостійкості, за наявності добавки СП-1 морозостійкість може практично не змінюватись або навіть дещо зростати.

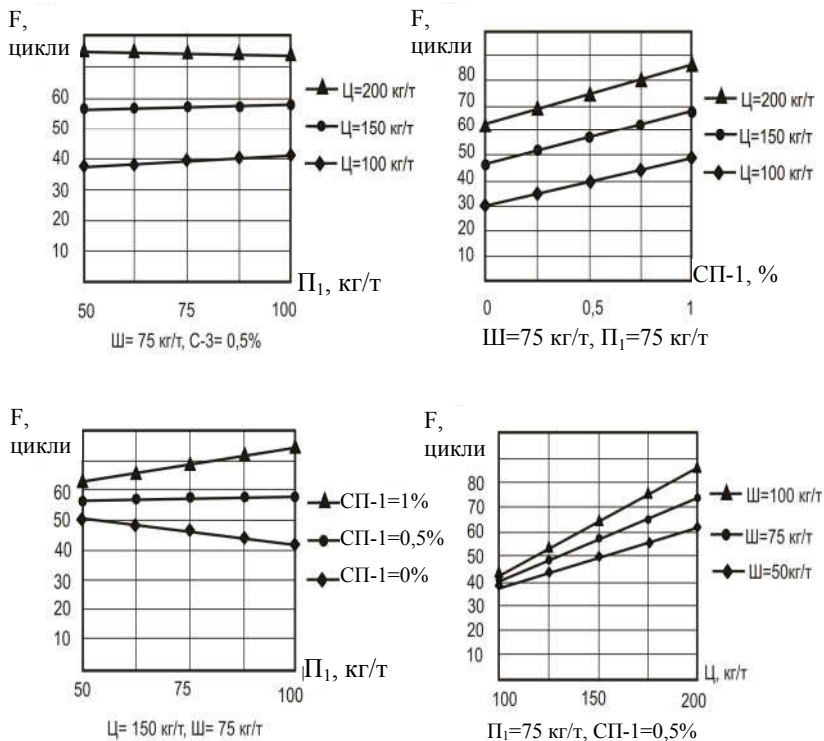


Рис. 4.17. Вплив складу сухої суміші на морозостійкість розчинів

Вплив вмісту лужних оксидів і вільного вапна у складі пилу-виносу на міцність розчинів

У зв'язку з можливими коливаннями в пилу клінкеровипалювальних печей вмісту лужних оксидів та вільного вапна виконані спеціальні дослідження щодо їх впливу на властивості розчинів на основі композиційних в'язучих, що включають портландцемент, доменний шлак та пил-винос. Для порівняння визначалися також фізико-механічні властивості розчинів на основі в'язучого, що містить портландцемент і пил. В'язучі отримували змішуванням у лабораторному лопатевому змішувачі всіх компонентів. При цьому шлак попередньо

подрібнювали до питомої поверхні $S_{\text{пит}}=310...330 \text{ м}^2/\text{кг}$ у лабораторному кульовому млині. До складу в'язучих двох типів вводили суперпластифікатор СП-1 у кількості 1% за масою. Регулювання вмісту лугів та вільного вапна досягали введенням добавок карбонату калію та негашеного вапна. Вміст пилошлакового наповнювача у в'язучому становив 50% за масою (в'язуче №1). У в'язучому, що містить як мінеральний наповнювач тільки пил-виносу (в'язуче №2) кількість останнього варіювалася від 20 до 50%. Сухі суміші отримували додаванням до в'язучих трьох частин за масою піску з $M_k=1,3$ і додатковим перемішуванням.

Досліди проводили відповідно до плану повнофакторного експерименту 2^3 . Умови планування експериментів наведені в табл. 4.21. Розчинові суміші отримували із сухих сумішей додаванням води до рухомості 8...10 см занурення конуса.

В результаті обробки та статистичного аналізу експериментальних даних (табл.4.22) отримані математичні моделі (табл.4.23) міцності на стиск і розтяг при згині затверділих розчинів на основі досліджуваних композиційних в'язучих у вигляді поліноміальних рівнянь регресії.

Таблиця 4.21

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання факторів	
Натуральний вид	Кодований вид	-1	+1
$R_2O^1, \%$	X_1	2,5	5,5
$CaO^2, \%$	X_2	2,8	5,8
$Пил^3, \%$	X_3	20	50
Пил/Шлак ⁴		0,3	1,2

Примітка: 1 – вміст лужних оксидів у складі в'язучого; 2 – вміст вільного оксиду кальцію у складі в'язучого; 3 – вміст пилу (Π_1) у складі в'язучого №2; 4 – співвідношення пилу (Π_1) і шлаку у в'язучому №1.

Таблиця 4.22

Міцнісні показники розчинів на основі
композиційних в'язучих

№	x ₁	x ₂	x ₃	В/в'яз	Міцність на розтяг при згині, МПа, у віці, діб		Міцність на стиск, МПа, у віці, діб	
					7	28	7	28
1	+1	+1	+1	$\frac{0,45}{0,41}$	$\frac{2,4}{4,8}$	$\frac{4}{6,9}$	$\frac{5,9}{12,1}$	$\frac{8,6}{17,8}$
2	+1	-1	+1	$\frac{0,43}{0,39}$	$\frac{4,3}{5,2}$	$\frac{6,2}{6,8}$	$\frac{11,5}{11,3}$	$\frac{16,2}{17,2}$
3	-1	+1	+1	$\frac{0,42}{0,39}$	$\frac{5,9}{5,4}$	$\frac{6,5}{8}$	$\frac{15,6}{12,4}$	$\frac{17,2}{20}$
4	-1	-1	+1	$\frac{0,41}{0,38}$	$\frac{7,1}{5,9}$	$\frac{7,6}{8,4}$	$\frac{20,5}{15,4}$	$\frac{28,4}{20}$
5	+1	+1	-1	$\frac{0,44}{0,4}$	$\frac{4,4}{4,5}$	$\frac{5,1}{8}$	$\frac{8,1}{8,9}$	$\frac{12,1}{17}$
6	+1	-1	-1	$\frac{0,42}{0,39}$	$\frac{6,7}{6,4}$	$\frac{7,4}{9}$	$\frac{18,6}{13,8}$	$\frac{22,6}{19,5}$
7	-1	+1	+1	$\frac{0,43}{0,38}$	$\frac{6,7}{6,4}$	$\frac{7,1}{8,7}$	$\frac{18,3}{13,7}$	$\frac{22}{19,3}$
8	-1	-1	-1	$\frac{0,43}{0,39}$	$\frac{6,1}{5,9}$	$\frac{6,6}{8,8}$	$\frac{17}{22,3}$	$\frac{18,7}{30,4}$

Примітка: Над рискою – В/в'яз і міцнісні показники для розчинів на основі композиційного в'язучого №2, під рискою – для в'язучого №1.

Таблиця 4.23

Експериментально-статистичні моделі міцнісних властивостей розчинів на основі композиційних в'язучих

Міцність у віці		Статистичні моделі	
Міцність на розтяг при згині, МПа	7 діб	$y'_1 = 5,56 - 0,0375X_1 + 0,0125X_2 - 0,5875X_3 + 0,063X_1X_2 - 0,288X_1X_3 + 0,013X_2X_3$	(4.30)
		$y_1 = 5,45 - 0,4X_1 - 0,575X_2 - 1,2X_3 + 0,075X_1X_2 - 0,450X_1X_3 - 0,325X_2X_3$	(4.31)
	28 діб	$y'_2 = 8,08 + 0,075X_1 - 0,2X_2 - 0,65X_3 - 0,05X_1X_3 - 0,375X_2X_3$	(4.32)
		$y_2 = 6,31 - 0,4125X_1 - 0,2625X_2 - 0,8625X_3 + 0,063X_1X_2 - 0,488X_1X_3 - 0,088X_2X_3$	(4.33)
Міцність на стиск, МПа	7 діб	$y'_3 = 13,74 - 1,6125X_1 + 1,1375X_2 - 2,5625X_3 - 0,313X_1X_2 + 0,938X_1X_3 - 0,613X_2X_3$	(4.34)
		$y_3 = 14,44 - 1,7125X_1 - 1,1875X_2 - 4,1625X_3 + 0,713X_1X_2 - 1,563X_1X_3 - 0,388X_2X_3$	(4.35)
	28 діб	$y'_4 = 20,15 - 1,75X_1 + 1,075X_2 - 2,15X_3 - 0,825X_1X_2 + 1,15X_1X_3 - 1,575X_2X_3$	(4.36)
		$y_4 = 18,23 - 1,9X_1 - 1,7X_2 - 4,7X_3 + 0,975X_1X_2 - 1,275X_1X_3 + 0,575X_2X_3$	(4.37)

Примітка: $y_1 \dots y_4$ – моделі міцнісних властивостей розчинів на основі композиційного в'язучого №2; $y'_1 \dots y'_4$ – в'язучого №1.

Вплив окремих факторів на міцність розчинів на основі досліджуваних композиційних в'язучих, що впливає із отриманих моделей, показано на рис.4.18, 4.19. При цьому на кожному з графіків розглядається вплив двох факторів, третій фактор за табл.4.21 знаходиться на нульовому рівні.

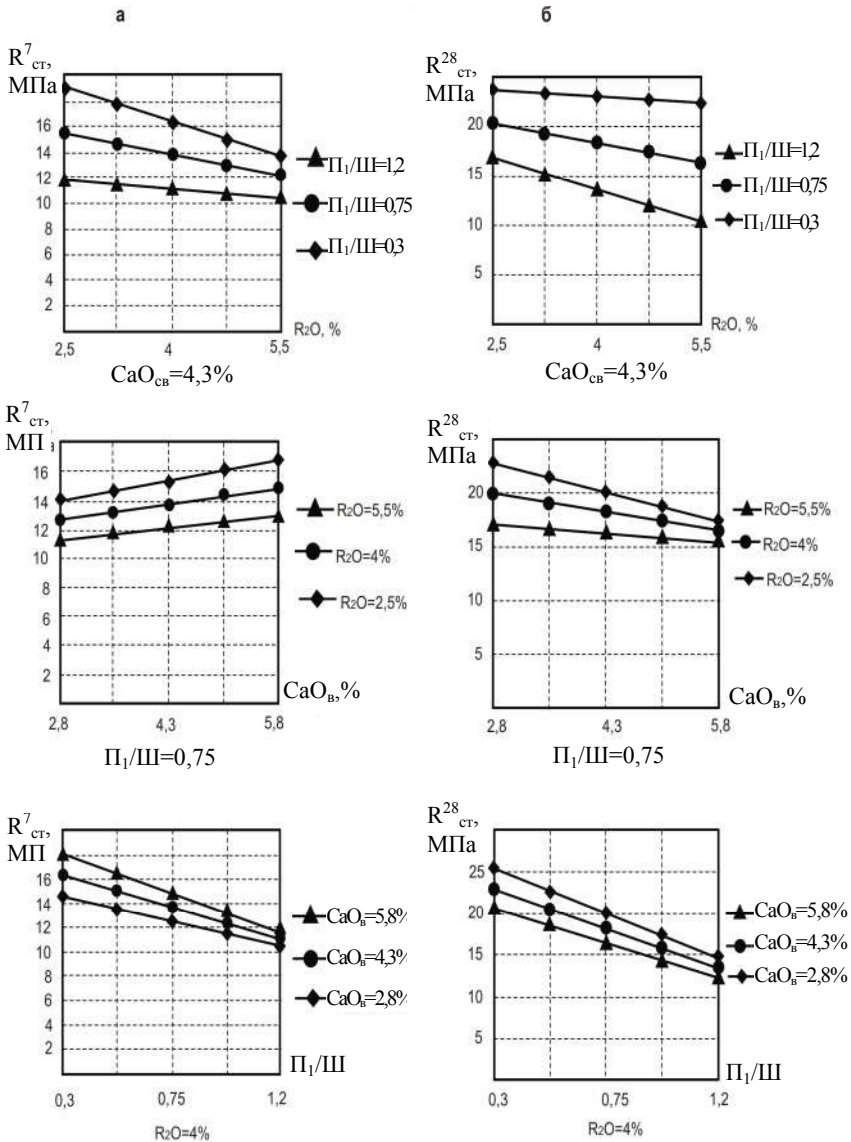


Рис.4.18. Вплив факторів складу композиційного в'язучого №1 (табл.4.22) на міцність розчинів при стиску у віці:
а – 7 діб, б – 28 діб

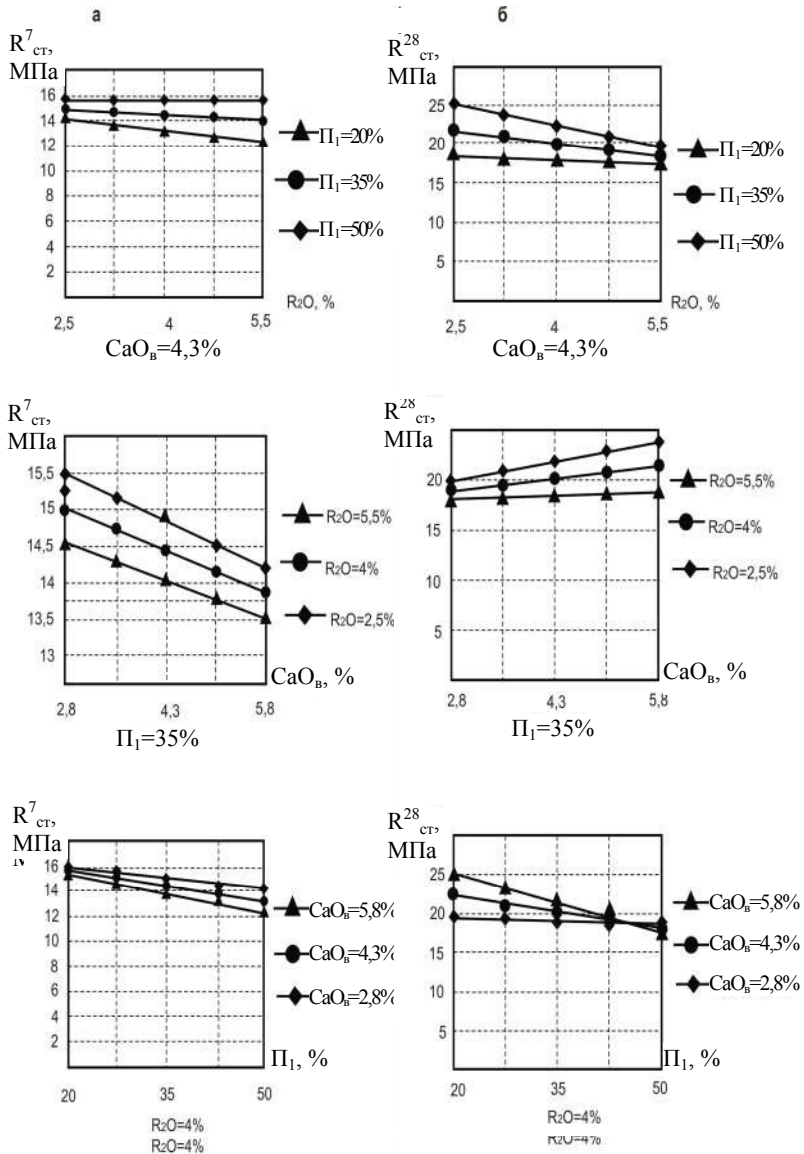


Рис.4.19. Вплив факторів складу композиційного в'язучого №2 (табл.4.22) на міцність розчинів при стиску у віці:
а – 7 діб, б – 28 діб

Аналіз залежностей міцності показує, що ступінь і характер впливу вмісту лужних оксидів і вільного вапна в'язучих №1 і №2 істотно відрізняється. Збільшення вмісту лугів впливає як в залежності від вмісту CaO, так і кількості пилу-виносу у складі в'язучих. Для розчинів, що не містять доменний шлак, збільшення вмісту лужних оксидів у складі в'язучих знижує міцність. Підвищений вміст лугів найбільш негативно відчувається для розчинів із відносно невеликим вмістом CaO_v. Збільшення вмісту лугів у складі в'язучого нівелюється при високому вмісті вільного вапна. Міцність розчинів досить різко знижується зі збільшенням у складі в'язучого вмісту пилу.

Для в'язучих, що містять композиційний пилошлаковий наповнювач, його вплив на міцність визначається складом пилу і масовим співвідношенням пил:шлак.

Для розчинів на композиційному в'язучому №2 збільшення вмісту R₂O від 3 до 7% (рис.4.19) при вмісті CaO_v 3% у віці 7 діб викликає зниження міцності на стиск на 10%, а в 28 діб на 20%. Приблизно такий же негативний ефект впливу на міцність має зміна в прийнятій області варіювання вмісту вільного оксиду кальцію. У 7-ми добовому віці при одночасному збільшенні вмісту у в'язучому №2 R₂O та CaO_v їх негативний ефект сумується. Для зразків 28-добового віку негативний вплив лугів у в'язучому при підвищеному вмісті вільного вапна зменшується.

Найбільший негативний вплив на міцність розчинів має збільшення у складі в'язучого вмісту пилу. При збільшенні вмісту пилу-виносу з підвищеною кількістю лугів до 50% від маси в'язучого міцність розчинів на стиск зменшується у 2,5 рази. Негативний вплив лугів при введенні у в'язуче пилу-виносу значно послаблюється за наявності в ньому доменного шлаку (В'яз. №1) (рис.4.18). Зі збільшенням в композиційному шлаковмісному в'язучому вмісті вільного вапна міцність розчинів практично не змінилася (рис.4.18), а при відносно невисокому вмісті лугів навіть зросла. Зі збільшенням пилошлакового відношення відзначається деяке зниження міцності розчинів, яке послаблюється при підвищеному вмісті лугів. При максимальному пилошлаковому відношенні зі збільшенням вмісту у в'язучому лугів і вільного вапна зниження міцності практично не спостерігається.

Таким чином, виконані дослідження показують, що в розчинах на композиційному цементно-пилошлаковому в'язучому значний вміст лугів і вільного вапна може позитивно впливати на міцність розчинів, що очевидно пов'язано з їх активуючим впливом на шлакову складову в'язучого. При цьому важливе значення має вибір оптимального масового співвідношення шлаку та пилу з урахуванням хімічного складу останнього.

4.5. Технологічні властивості розчинових сумішей

Технологічна придатність розчинових сумішей для мурувальних робіт значною мірою визначається їх рухомістю.

На практиці виникає завдання уточнення необхідної кількості води залежно від складу суміші та необхідної рухомості. Знаючи необхідне в'язуче-водне відношення для досягнення необхідної міцності, можна відповідним чином коригувати або вибирати склад суміші, щоб він забезпечував як задану рухомість, так і міцність розчину.

Для визначення впливу складу сухої суміші на водопотребу, необхідну для досягнення заданої рухливості, був реалізований трирівневий, близький до D-оптимального, план експерименту N_{a_5} . Умови планування експериментів, які використовувались раніше при вивченні впливу складу сухих сумішей на властивості затверділих розчинів (табл.4.16), доповнено з урахуванням впливу фактора рухомості розчинових сумішей по зануренню конуса (X_5) (табл.4.24).

Таблиця 4.24

Умови планування експериментів при вивченні впливу складів сухих сумішей на їх водопотребу

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Витрата цементу, (Ц), кг/т	X_1	100	150	200	50
Витрата шлаку, (Ш), кг/т	X_2	50	75	100	25
Витрата пилу, (П _В), кг/т	X_3	50	75	100	25
Витрата суперпластифікатора, (СП-1), % від маси в'язучого	X_4	0	0,5	1	0,5
Рухомість за зануренням конуса, см (ЗК)	X_5	4	8	12	4

Результати дослідів наведено у табл.4.25.

Таблиця 4.25

Результати дослідів з визначення водопотреби
розчинових сумішей

№	Фактори					Водопотреба, л/м ³
	X ₁ (Ц, кг/т)	X ₂ (Ш, кг/т)	X ₃ (П ₁ , кг/т)	X ₄ (СП-1, %)	X ₅ (ЗК, см)	
1	+1	+1	+1	+1	+1	235
2	-1	-1	+1	+1	+1	222
3	-1	+1	-1	-1	-1	245
4	+1	-1	-1	-1	-1	251
5	-1	+1	-1	+1	+1	222
6	+1	-1	-1	+1	+1	218
7	+1	+1	+1	-1	-1	262
8	-1	-1	+1	-1	-1	266
9	-1	+1	+1	+1	-1	207
10	+1	-1	+1	+1	-1	215
11	+1	+1	-1	-1	+1	268
12	-1	-1	-1	-1	+1	262
13	-1	+1	+1	-1	+1	295
14	+1	-1	+1	-1	+1	289
15	+1	+1	-1	+1	-1	219
16	-1	-1	-1	+1	-1	213
17	+1	0	0	0	0	228
18	-1	-1	0	0	0	225
19	0	+1	0	0	0	230
20	0	-1	0	0	0	228
21	0	0	+1	0	0	234
22	0	0	-1	0	0	222
23	0	0	0	+1	0	213
24	0	0	0	-1	0	261
25	0	0	0	0	0	235
26	0	0	0	0	-1	218
27	0	0	0	0	0	226

В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримана квадратична поліноміальна модель водопотреби розчинової суміші, адекватна при 95% довірчій ймовірності:

$$\begin{aligned}
 B = & 226 + 1,5X_1 + X_2 + 5,78X_3 - 24,2X_4 + 8,34X_5 + \\
 & + 0,292X_1^2 + 2,79X_2^2 + 1,79X_3^2 + 11,29X_4^2 + 0,79X_5^2 + \\
 & + 0,31X_1X_2 - 0,19X_1X_3 + 1,31X_1X_4 - 0,69X_1X_5 + 0,81X_2X_4 + \\
 & + 2,56X_2X_5 - 4,94X_3X_4 + 3,1X_3X_5 - 2,94X_4X_5
 \end{aligned} \quad (4.38)$$

Модель дозволяє вирішувати завдання двох типів:

1) прогнозувати зміну витрати води за заданої рухомості розчинової суміші залежно від складу сухої суміші.

2) визначати необхідну витрату води для сухої суміші заданого складу при зміні рухомості суміші.

Розв'язання даних задач можливе за допомогою інтерполяційних розрахунків за моделлю або за номограмою (рис. 4.20).

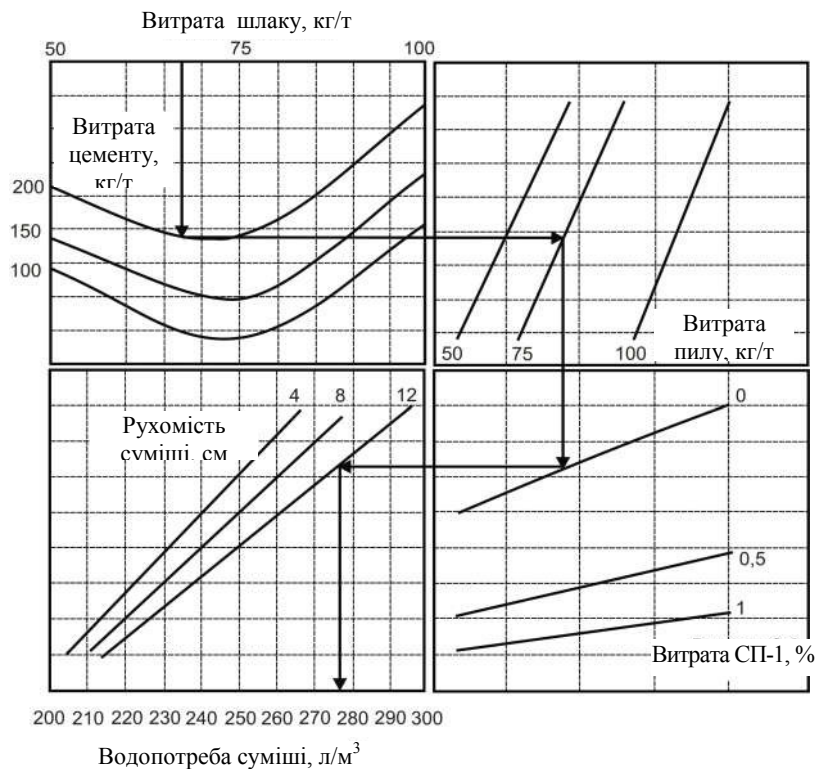


Рис.4.20. Взаємозв'язок між складом, рухомістю розчинової суміші та її водопотребою

Аналіз речовинного складу сухої та відповідно розчинової суміші на її водопотребу (рис.4.20) дозволяє вважати, що при заданій рухомості та постійних вихідних матеріалах найбільш істотними факторами, що впливають на необхідну витрату води є витрата добавки суперпластифікатора і вміст пилу-виносу. Якщо добавка суперпластифікатора при дозуванні до 1% маси наповненого в'язучого ($3,5...5 \text{ кг/м}^3$) дозволяє суттєво в межах 20...25% зменшити водозміст, то добавка пилу-виносу у складі в'язучого та розчину значно збільшує водовміст. При цьому при наявності добавки СП-1 збільшення вмісту пилу у складі в'язучого менше позначається на збільшенні водовмісту, ніж без добавки суперпластифікатора. Найбільш відчутно зростає водоредукуючий ефект зі збільшенням вмісту СП-1 від 0 до 0,5%. Зі зміною вмісту СП-1 від 0,5 до 1% збільшення водоредукуючого ефекту сповільнюється.

Зміна вмісту портландцементу і шлаку у складі в'язучого та розчину в досліджуваній області варіювання позначається на водопотребі значно меншою мірою.

Отримані дані добре узгоджуються з експериментальними результатами інших авторів. Зокрема, найбільший розріджуючий ефект добавки СП-1 у розчинових сумішах на композиційному в'язучому з високою вихідною рухомістю узгоджується з відомим положенням про те, що чим більший об'єм води в міжзерновому просторі цементу, тим більше водоредукуючий ефект при введенні суперпластифікатора. Текучість розчинової, так само як і бетонної суміші знаходиться в прямій залежності від об'єму та текучості цементного тіста.

Враховуючи хіміко-мінералогічний склад пилу-виносу клінкеровипалювальних печей його можна віднести до мінеральних добавок з порівняно низькою гідравлічною активністю. За даними В.Г. Батракова, Т.Е. Тюріної та В.Р. Фалікмана [119] найбільшого зниження водопотреби бетонних сумішей (23...29%) можна досягти на середньоалюмінатних цементах або на цементі, що містить у своєму складі мінеральні добавки з низькою гідравлічною активністю. Для отримання такого ефекту необхідно порівняно невелике дозування СП-1 (0,5...0,7%).

Водоредукуючий ефект дії таких суперпластифікаторів як СП-1 залежить від природи адсорбенту. У пилу-виносу як компоненті композиційного в'язучого превалює карбонатний компонент, що характеризується високою адсорбційною здатністю [119].

Для уточнення впливу зміни вмісту лугів та вільного вапна на водопотребу проведено дослідження з використанням сухих сумішей на композиційному в'язучому із застосуванням пилу ПІ (табл.4.26). Вміст Na_2O і $\text{CaO}_в$ у пилу коригували введенням добавок Na_2CO_3 і негашеного вапна.

Таблиця 4.26

Вплив вмісту Na_2O та $\text{CaO}_в$ у пилу на водопотребу розчинових сумішей

№	Склад в'язучого, кг/т сухої суміші				Вміст R_2O та $\text{CaO}_в$, %		Рухомість, см	Водопотреба, л/м ³
	Ц	Ш	П ₁	СП-1	R_2O	$\text{CaO}_в$		
1	200	100	100	4	2,5	2,8	12	235
2					5,5	2,8	12	228
3					2,5	5,8	12	249
4					5,5	5,8	12	245
5	100	100	100	3	2,5	2,8	4	202
6					5,5	2,8	4	201
7					2,5	5,8	4	217
8					5,5	5,8	4	215
9	100	50	50	2	2,5	2,8	4	195
10					5,5	2,8	4	190
11					2,5	5,8	4	201
12					5,5	5,8	4	200

Дослідження були проведені на розчинах двох характерних складів, з рухомістю розчинових сумішей 4 і 12 см. Як свідчать отримані дані (табл.4.26) збільшення вмісту R_2O у пилу від 2,5 до 5,5% не змінило або дещо зменшило витрату води, яка необхідна для досягнення заданої рухомості. Збільшення вмісту вільного вапна у складі пилу, як і варто було очікувати, практично незалежно від вмісту R_2O викликало помітне збільшення водопотреби розчинових сумішей.

Важливими технологічними властивостями розчинових сумішей, призначених для мурувальних робіт є достатня водоутримуюча здатність і як наслідок, низьке водовідділення. Останнє, як відомо [118], зумовлено седиментаційними процесами у свіжоукладеній розчиновій суміші. Седиментаційні процеси можуть мати місце в період, що передує утворенню сталої коагуляційної структури. На практиці водовідділення значно зменшують, вводячи в розчинові суміші вапняне тісто, дисперсні гідралічні добавки, пластичну глину, повітровтягуювальні ПАР. У сучасному виробництві сухих будівельних сумішей для забезпечення достатньої водоутримуючої здатності розчинових сумішей застосовують такі добавки, як ефіри целюлози, здатні утворювати аквакомплекси, які міцно утримують воду.

Як було показано І.М. Ахвердовим [186], водоутримуюча здатність цементного тіста зберігається до $V/C \approx 1,65K_{н.г.}$, де $K_{н.г.}$ – нормальна густина цементу. При такому V/C граничне напруження зсуву та в'язкість цементного тіста досягають мінімальних значень.

Для бетонної суміші І.М. Грушко запропоновано [187] кількість утриманої води знаходити за допомогою формули:

$$B_{ут} = 1,35K_{н.г.}C + B_{нк}Pk + 0,07S_{щ}, \quad (4.39)$$

де C і P_k – відповідно, питомі витрати цементу та піску, $кг/м^3$,

$S_{щ}$ – питома поверхня крупного заповнювача,

$B_{нк}$ – водопотреба піску.

Пізніше Л.Й. Дворкін та О.Л. Дворкін обґрунтували інше рівняння для розрахунку кількості води, що міститься у бетонній суміші [118]:

$$B_{ут} = 1,35...1,65K_{н.г.}C + B_{нк}Pk + B_{щ}Щ, \quad (4.40)$$

де $B_{нк}$ і $B_{щ}$ – значення водопотреби дрібного та крупного заповнювача.

Відповідно до наведених рівнянь вирішальний внесок у кількість утримуваної води вносять нормальна густина і витрата в'язучого. Очевидно, цей висновок має бути справедливим і для розчинових сумішей.

Водоутримуючу здатність знаходили випробуванням розчинових сумішей товщиною 12 см, покладених на промокальний папір після 10 хв. витримки:

$$B_{ym} = 100 - \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3} \cdot 100, \quad (4.41)$$

де m_1 і m_2 – маса паперу відповідно до та після випробувань;
 m_3 і m_4 – маса пристрою без та з розчиною сумішшю, г.

Результати визначення B_{yt} для розчинових сумішей на основі характерних складів сухих сумішей з урахуванням можливих коливань R_2O та CaO_B наведено в табл.4.27. Водоутримуюча здатність виявилася недостатньою для розчинів складів 9...12, які характеризуються порівняно невеликим об'ємом цементного тіста.

Таблиця 4.27

Результати визначення B_{yt} для розчинових сумішей

№	Склад вяжучого, кг/т сухої суміші				Склад R_2O та CaO_B , %		Нормальна густота, %	Водоутримуюча здатність, %
	Ц	Ш	П ₁	СП-1	R_2O	CaO_B		
1					2,5	2,8	31,9	96,4
2	200	100	100	4	5,5	2,8	30,8	95,5
3					2,5	5,8	33,2	97,2
4					5,5	5,8	32,5	97,1
5					2,5	2,8	31,4	95,3
6	100	100	100	3	5,5	2,8	30,5	95,2
7					2,5	5,8	34,2	96,8
8					5,5	5,8	33,3	95,6
9					2,5	2,8	30,8	91,2
10	100	50	50	2	5,5	2,8	29,6	90,3
11					2,5	5,8	33,5	93,4
12					5,5	5,8	33,1	93,5

Примітка: 1. Розчинів суміші складів 1...4 мали рухомість 12 см, 5...12 – 4 см. **2.** Коефіцієнт виходу розчинової суміші складів 1...4 становив у середньому 0,7, 5...12 – 0,6.

Введення пилу-виносу до складу композиційних в'язучих, збільшуючи в'язкість паст на їх основі, сприяє збільшенню нормальної густоти та водоутримуючої здатності розчинів. Збільшення у складі в'язучих лугів, які містяться у пилу-виносу не більше 2,5...5,5%, практично не позначається на водоутримуючій здатності розчинів, а вільного вапна у межах 2,8...5,8% сприяє деякому її збільшенню. Розрахунки (табл.4.28) показують, що для всіх складів розчинів з вмістом води $V < 1,35K_{н.г.}$ ($Ц+Ш+П_1$), ($K_{н.г.}$ – нормальна густота в'язучого в частках одиниці) водоутримуюча

здатність забезпечується не менше 95%. При невиконанні цієї вимоги вона стає меншою за необхідне значення.

Таблиця 4.28

Водоутримуюча здатність розчинових сумішей та
розрахункові значення водопотреби

№ складу за табл. 4.27	Витрати в'язучого, кг/т (Ц+Ш+П ₁)	Коефіцієнт виходу β	Витрата в'язучого, кг/м ³ розчину $P_g = \frac{(Ц+Ш+П_1)}{\beta}$	Водовміст, л/м ³		Водоутримуюча здатність, %
				Розр	Експ	
1	400	0,7	571	256	235	96,4
2	400	0,7	571	237	228	95,5
3	400	0,7	571	255	249	97,2
4	400	0,7	571	250	245	97,1
5	300	0,6	500	212	2022	95,5
6	300	0,6	500	206	201	95,2
7	300	0,6	500	230	217	96,8
8	300	0,6	500	219	215	95,6
9	200	0,6	333	139	195	91,2
10	200	0,6	333	117	190	90,3
11	200	0,6	333	151	201	93,4
12	200	0,6	333	145	200	93,5

Час придатності розчинових сумішей повинен, очевидно, визначатись часом, протягом якого рухомість знижується до мінімально допустимої для цієї марки. Як відомо, зміна рухомості бетонних та розчинових сумішей зумовлена зміною їх реологічних властивостей залежно від часу та температури. У роботі В.А. Бабаєва [183] через 60 хв. витримки значення пластичної міцності цементного тіста з додаванням СП-1 виявилися в середньому в 3,5 рази вищими за початкові. На зміні рухомості сумішей у часі повинні, очевидно, позначатися всі чинники, що визначають швидкість гідратації цементу. Крім В/Ц і температури до таких факторів належать активність, дисперсність в'язучого, його строки тужавлення та ін.

Вивчали зміну рухомості розчинової суміші двох характерних складів при початковому зануренні еталонного конуса 14 і 8 см і різному вмісті у в'язучому лузі і вільного вапна. Досліди проводили при температурі розчинової суміші 20±3°C з

вимірюванням рухомості суміші відразу після замішування і потім через кожні 30 хв.

Застосовували портландцемент марки М500 двох партій, що відрізнялися строками тужавлення: №1 з початком тужавлення 2 год. 15 хв. та №2 з початком тужавлення 1 год. 30 хв. Результати дослідів наведено на рис.4.19, 4.20.

Застосовували портландцемент марки М500 двох партій, що відрізнялися строками тужавлення: №1 з початком тужавлення 2год. 15 хв. та №2 з початком тужавлення 1 год. 30 хв. Результати дослідів наведено на рис. 4.21, 4.22. З них випливає, що характер кривих падіння рухомості розчинових сумішей у часі задовільно апроксимується функцією типу:

$$y = a^x, \quad (4.42)$$

де x – показник степеня, що характеризує тривалість витримки суміші;

a – основа степеня, на величину якої впливає склад сухої і відповідно розчинової суміші, вміст лугів і вільного вапна.

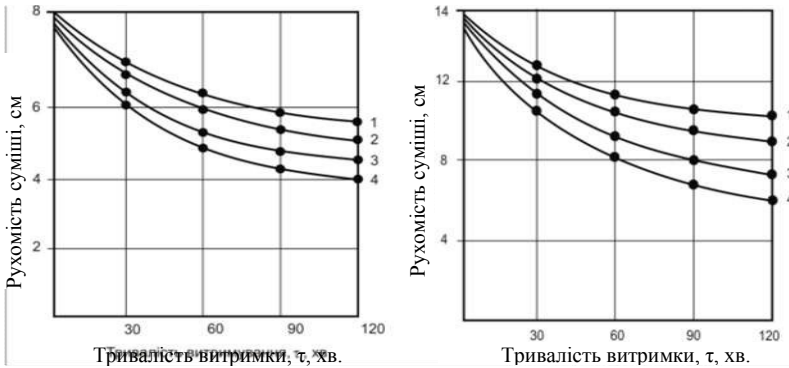


Рис.4.21. Вплив тривалості витримки на рухомість розчинової суміші (склад сухої суміші: Ц=100 кг/т, Ш=100 кг/т, П₁=100 кг/т, П_к=700 кг/т; початок тужавлення 2 год. 15 хв.):

- 1 – R₂O=2,5%, CaO_в=5,8% ; 2 – R₂O=2,5%, CaO_в=2,8%;
- 3 – R₂O=5,5%, CaO_в=2,8%; 4 – R₂O=5,5%, CaO_в=5,8%.

Найбільш плавно знижується рухомість розчинових сумішей у часі при мінімальному вмісті лужних оксидів та підвищеному вмісті вільного вапна (рис.4.21, 4.22).

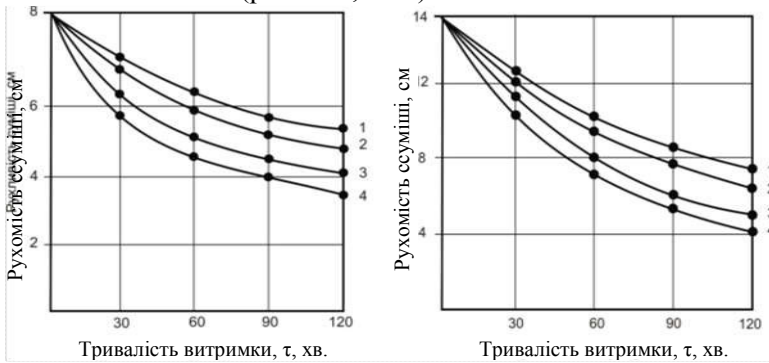


Рис.4.22. Вплив тривалості витримки на рухомість розчинової суміші (склад сухої суміші: Ц=200 кг/т, Ш=100 кг/т, ПІ=100 кг/т, Пк=600 кг/т; початок тужавлення 1 год. 30 хв):

- 1 – $R_2O=2,5\%$, $CaO_B=5,8\%$; 2 – $R_2O=2,5\%$, $CaO_B=2,8\%$;
- 3 – $R_2O=5,5\%$, $CaO_B=2,8\%$; 4 – $R_2O=5,5\%$, $CaO_B=5,8\%$

Більш швидшому падінню рухомості сприяє збільшення вмісту в'язучої складової розчинової суміші та прискорення строків тужавлення цементу як основного її компонента.

Забезпечення мінімально допустимої для даної марки суміші рухомості за нормованого часу придатності можливе при виборі відповідної величини вихідної рухомості, отриманої безпосередньо після замішування.

Збільшення тривалості початку тужавлення цементу, а також зменшення вмісту в'язучого розширює діапазон можливого вмісту лугів у пилу.

Таким чином, проведені дослідження показують можливість застосування цементнопилошлакових в'язучих для виготовлення сухих будівельних сумішей для мурувальних та інших розчинів. Сухі суміші, отримані змішуванням вихідних компонентів в'язучого, добавки пластифікатора та дрібнозернистого кварцового піску характеризуються 28-добовою міцністю при стиску 10-30 МПа при рухомості розчинової суміші 8-10 см. До 7-добового віку міцність розчинів досягає 70% марочної.

5. БУДІВЕЛЬНІ РОЗЧИНИ НА ОСНОВІ СУМІШЕЙ З ЗАСТОСУВАННЯМ АСПІРАЦІЙНОГО ГРАНІТНОГО ПИЛУ (АГП)

5.1. АГП як дисперсний наповнювач розчинів

Аспіраційні системи на дробильно-сортувальних заводах та установках встановлюють для боротьби з пилом, що утворюється при подрібненні, та очищення повітря перед викидом його в атмосферу. Пил уловлюється в циклонах, а при двоступінчастому очищенні також у рукавних фільтрах.

Однією з основних галузей можливого застосування аспіраційного пилу є використання його як дисперсного наповнювача в сухих будівельних сумішах різного призначення [188]. До поширених видів аспіраційного пилу відноситься пил, отриманий при подрібненні граніту.

Граніт належить до кислих магматичних інтрузивних порід. У мінеральному складі гранітів переважають лужні польові шпати, вміст яких сягає 60...65%. Другою складовою гранітів є кварц – 25...35% [145]. Мінерали, з яких складаються граніти, відповідно до класичних уявлень, хімічно неактивні в цементних розчинах та бетонах при нормальному твердінні і пропарюванні. Тільки за умов автоклавної обробки вони хімічно взаємодіють із портландцементом. Разом з тим, якщо в гранітах так само, як і в інших кислих гірських породах, частина кремнезему представлена аморфним різновидом, вони можуть характеризуватись певною пуцолановою активністю. За даними [71] аморфний діоксид кремнію в зернах менше 0,16 мм гранітних відсівів подрібнення являє собою наносфери з розмірами від 200 до 600 нм. Відповідно до класифікації [71] до активних наповнювачів можна віднести мінеральні порошки з активністю поглинання CaO від 10 до 75 мг/г. У роботі [47] частинки фракції гранітних відсівів менше 0,16 мм мали активність 18,3 мг/г CaO.

Активність аспіраційного пилу значною мірою характеризується енергетичним станом поверхні зерен, дефектами кристалічних ґраток, утвореними при подрібненні, зумовленими вільними радикалами внаслідок руйнування хімічних зв'язків [189]. Як відомо, поверхня мінеральних матеріалів мозаїчна та

характеризується сумою зарядів із певним знаком. Для частинок менше 0,16 мм відзначається значний рівень аморфізації поверхні. На ній завжди є адсорбована вода та шар гідроксильних груп. Найвністю цих груп пояснюється виникнення зарядів та стрибок потенціалу на межі поділу фаз. Від розподілу гідроксильних груп залежать також кислотно-основні (донорно-акцепторні) властивості поверхні мінерального порошку. На поверхні кремнеземистих мінеральних матеріалів, до яких належить і гранітний пил, знаходиться значна кількість кислотних центрів [43], що має сприяти інтенсифікації процесів гідратації портландцементу.

Дослідження [190] показали, що порошок граніту є високогідрофільним, має негативний потенціал, високоенергетичну поверхню і, відповідно, підвищену адсорбційну здатність. Відповідно до теорії Ленгрюма [191] адсорбційна здатність твердих тіл визначається наявністю на їх поверхні ненасичених валентностей атомів або молекул.

Підвищення активності гранітного порошку як мінерального наповнювача у цементних композитах можливе при підвищенні його дисперсності. Для аспіраційного пилу дисперсність залежить від способу та режиму уловлювання, характеристик пиловловлюючих пристроїв.

Із загальнотеоретичних міркувань для досягнення високої адгезійної міцності в системі цементне в'язуче-наповнювач важливо забезпечити необхідну змочуваність наповнювача, що можливо за рахунок зменшення міжфазової поверхневої енергії при обробці наповнювача поверхнево-активною в'язучою речовиною. У сухі будівельні суміші зазвичай вводять одну або кілька добавок ПАР. Як правило, вони входять до групи добавок-регуляторів реологічних властивостей розчинових сумішей. Крім пластифікаторів або суперпластифікаторів до них відносять водоутримуючі (ефіри целюлози та ін.), стабілізуючі добавки (ефіри крохмалю та ін). Якщо більшість пластифікаторів входять до групи іоногенних ПАР, то такі добавки як ефіри целюлози або крохмалю є неіоногенними ПАР.

У технології сухих будівельних сумішей (СБС) зазвичай прийнято одностадійне перемішування всіх компонентів. Для повнішої взаємодії ПАР з наповнювачем з метою підвищення його активності доцільніше двоступінчасте перемішування: на першому

етапі – наповнювача та добавок ПАР, на другому – модифікованого наповнювача з іншими компонентами СБС. Такий спосіб може вважатися більш перспективним з позиції досягнення підвищеного водоредукуючого ефекту суперпластифікуючої добавки в розчинових сумішах [26].

Для підвищення хімічної активності мінеральних порошків, таких як гранітний пил, є перспективним їх комбінування з високоактивними кремнеземистими або алюмокремнеземистими добавками.

Аспіраційний гранітний пил залежно від способу пилословлювання може бути умовно поділений на два види:

– аспіраційний пил високої дисперсності (ГАПВД), що уловлюється рукавними фільтрами;

– аспіраційний пил середньої дисперсності (ГАПСД), що уловлюється циклонами.

Хімічний склад гранітного аспіраційного пилу та його фізичні характеристики наведено у табл. 5.1 та 5.2.

Результати досліджень гранулометричного складу АГП наведено на рис. 5.1.

Таблиця 5.1

Хімічний склад гранітного аспіраційного пилу

Назва показника	Позначення показника	Кількісне значення, %
Оксид кальцію	CaO	1,29
Оксид кремнію	SiO ₂	72,97
Оксид алюмінію	Al ₂ O ₃	13,6
Оксид заліза (III)	Fe ₂ O ₃	0,98
Оксид заліза (II)	FeO	0,58
Оксид магнію	MgO	0,46
Оксид титану	TiO ₂	0,3
Оксид натрію	Na ₂ O	3,91
Оксид калію	K ₂ O	5,18
Оксид фосфору	P ₂ O ₅	0,08
Оксид водню	H ₂ O	0,15
Втрати при прожарюванні	ППП	0,6

Таблиця 5.2

Фізичні характеристики гранітного
аспіраційного пилу

№ з/п	Характеристики	Величина
1	Питома поверхня, м ² /кг - ГАПВД - ГАПСД	680...720 240...260
2	Насипна густина, кг/м ³ - ГАПВД - ГАПСД	590...650 820...870
3	Зерновий склад, % до 20 мкм 20...40 мкм 40...80 мкм 80...160 мкм	15,5...25,5 36,5...45,5 24,9...33,5 3,1...14,5
4	Вміст глинистих частинок, %	0,2...0,5
5	Вологість, %	0,3...0,5
6	Наявність водорозчинних домішок, %	відсутні

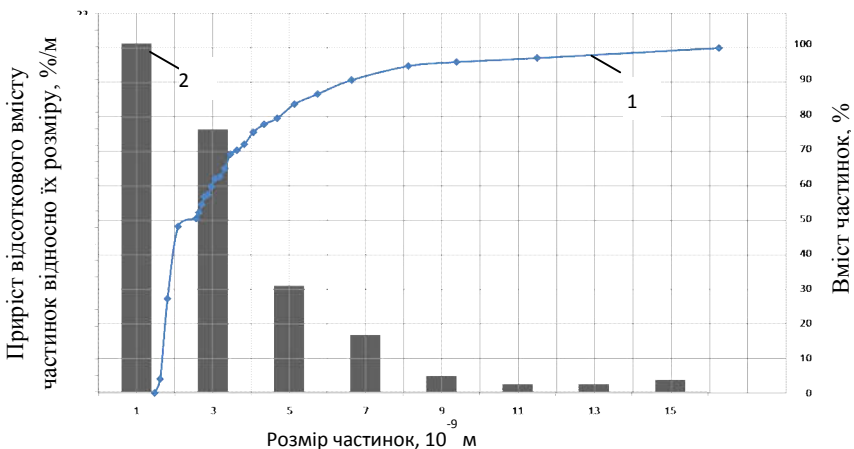


Рис. 5.1. Інтегральна (1) та диференціальна (2) криві розподілу частинки аспіраційного гранітного пилу за розмірами

5.2. Порівняльні дослідження впливу АГП та золи-виносу на міцність цементних розчинів

Для оцінки спільного впливу наповнювачів і пластифікуючих добавок на властивості цементно-піщаних розчинів були виконані алгоритмізовані експерименти з використанням в якості наповнювачів аспіраційного пилу (ГАПСД) і для порівняння золи-виносу Бурштинської ТЕС з пластифікатором нафталін-формальдегідного типу СП-1. Дослідження виконували з використанням методів математичного планування експерименту. Було використано типовий план експериментів V_4 [168].

Основними чинниками, які впливають на властивості будівельних розчинів, прийняті: витрата добавки суперпластифікатора, ступінь наповнення цементу Н/Ц, витрата цементу, цементно-водне відношення Ц/В (табл. 5.3).

Вихідними параметрами були міцність на стиск у віці 28 діб, МПа та розплив конуса (РК, мм) на струшуючий столик.

Таблиця 5.3

Умови планування експериментів при отриманні
рівняння 5.1...5.4

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
Вміст суперпластифікатора СП-1, %	x_1	0	0,5	1	0,5
Ступінь наповнення Н/Ц: – ГАПСД; – зола Бурштинської ТЕС	x_2	0	0,45	0,9	0,45
Витрата цементу, кг/м^3	x_3	340	400	460	60
Ц/В	x_4	1,68	1,89	2,30	0,41

В результаті статистичної обробки експериментальних даних були отримані рівняння регресії, які можна розглядати як математичні моделі міцності розчину на стиск ($R_{ст}$) та розпливу конуса розчинової суміші (РК) при застосуванні двох видів наповнювачів:

Наповнювач – аспіраційний пил:

$$R_{cm} = 29,6 + 2,21x_2 + 6,54x_3 + 1,17x_4 - 2,2x_1^2 - 1,7x_2^2 - 2,45x_3^2 - 2,65x_4^2 + 1,66x_1x_2 - 1,39x_1x_3 + 1,57x_2x_3 + 3,02x_3x_4; \quad (5.1)$$

$$PK = 129,7 + 12,1x_1 - 5,1x_2 + 20,8x_3 - 19,8x_4 + 2,1x_1^2 - 2,9x_2^2 + 3,1x_3^2 - 3,9x_4^2 + 5,8x_1x_3 - 4,7x_1x_4 - 3,2x_2x_3 - 13,4x_3x_4. \quad (5.2)$$

Наповнювач – зола Бурштинської ТЕС:

$$R_{cm} = 34,15 + 5,1x_2 + 5,07x_3 + 0,26x_1^2 - 5,54x_2^2 - 4,34x_3^2 - 1,04x_4^2 + 1,51x_1x_2 - 1,57x_1x_3 + 1,24x_1x_4 - 1,16x_2x_4 + 3,02x_3x_4; \quad (5.3)$$

$$PK = 161,4 + 18,5x_1 + 9,2x_2 + 24x_3 - 27,2x_4 - 5,6x_1^2 - 24,1x_2^2 - 7,1x_3^2 + 16,4x_4^2 + 9,6x_1x_2 + 7,7x_1x_3 - 6,1x_1x_4 - 6,4x_2x_4 - 11,1x_3x_4. \quad (5.4)$$

Аналіз коефіцієнтів регресії рівнянь (5.1...5.3) показує, що характер залежності міцності розчину від досліджуваних факторів має нелінійний характер. Залежно від ступеня впливу на міцність при стиску за абсолютними значеннями фактори в обраних інтервалах варіювання розташовуються в наступній послідовності:

$$СП-1 > Ц > Н/Ц > Ц/В.$$

Найбільш сильними взаємодіями факторів виявилися такі: "витрата цементу-цементно-водне відношення", "ступінь наповнення-витрата цементу"; відчутною є також взаємодія "витрата суперпластифікатора СП-1 – витрата цементу".

Квадратичні ефекти в рівняннях (5.1 і 5.3) з негативним знаком свідчать про те, що збільшення значення кожного фактора від мінімуму -1 до максимуму +1 за інших рівних умов з деякого моменту викликає зниження міцності, тобто виявляється зона оптимуму міцності в досліджуваному факторному просторі.

Особливий інтерес викликає характер залежності міцності розчинів від ступеня заповнення частинками АГП. Диференціювання за X_2 дає можливість отримати рівняння оптимуму:

$$x_{2opt} = 1/3,4(2,21 + 1,68x_1 + 1,57x_3). \quad (5.5)$$

Оптимальний ступінь наповнення $(H/C)_{\text{опт}}$ розчинів гранітним пилом при введенні суперпластифікатора СП-1 залежить тільки від витрати цементу та зменшується зі збільшенням останнього.

Для технологічної інтерпретації рівнянь регресії побудовано двофакторні діаграми (поверхні відгуку), отримані при аналізі рівнянь регресії відносно двох змінних при фіксуванні інших факторів на певному рівні (рис. 5.1, 5.2). На кожному перерізі показана сукупність кривих однакової міцності, що дозволяє передбачити вплив факторів x_2 та x_3 при фіксуванні інших на основних рівнях. Ізолінії характеризують можливе співвідношення факторів, що забезпечують однакову міцність. Розрахунок оптимальної витрати суперпластифікатора показує, що добавки СП-1 $x_{1\text{опт}}=0$, тобто 0,5%. На рис. 5.1 чітко спостерігається наявність зони оптимальної міцності при значенні $R_{cm}>30$ МПа; вона характеризується наступними параметрами складу розчину:

$$Ц=460...444 \text{ кг/м}^3;$$

$$H/C=0,375...0,5;$$

$$Ц/B=2,19...2,3, \text{ СП-1} - 0,5\%.$$

Для оцінки загального впливу технологічних факторів побудовано також графіки міцності в залежності від ступеня наповнення H/C (x_2) та витрати добавок СП-1 (x_1) при фіксованих на основному (нульовому) рівні значеннях витрати цементу (x_3) та цементно-водного відношення (x_4) (рис. 5.2).

При використанні аспіраційного пилу при $C/B=1,68$ у вивченому факторному просторі відзначається зона оптимальної витрати наповнювача та добавки, при якій забезпечується найбільша міцність. При $C/B=1,68$ та витраті цементу $336...460 \text{ кг/м}^3$ оптимальна міра наповнення зростає зі збільшенням витрати суперпластифікатора. У розчинах без добавки суперпластифікатора $(H/C)_{\text{опт}}=0,25...0,35$, при витраті суперпластифікатора до 0,5% маси цементу $(H/C)_{\text{опт}}=0,35...0,45$, а 0,5...1% – $(H/C)_{\text{опт}}=0,45...0,55$. При $C/B=2,3$ (рис. 5.2) та витраті цементу $336...460 \text{ кг/м}^3$ оптимальна міра наповнення не збільшується з підвищенням витрати суперпластифікатора, а залежить лише від витрати цементу. Витрата суперпластифікатора за цих умов має оптимальне значення 0,45...0,65% маси цементу. Це пояснюється тим, що при $C/B=2,3$ необхідний водоміст суміші за даної рухомості не забезпечується. У

таких умовах пластифікуюча добавка лише усуває негативний вплив наповнювачів на реологічні параметри розчину.

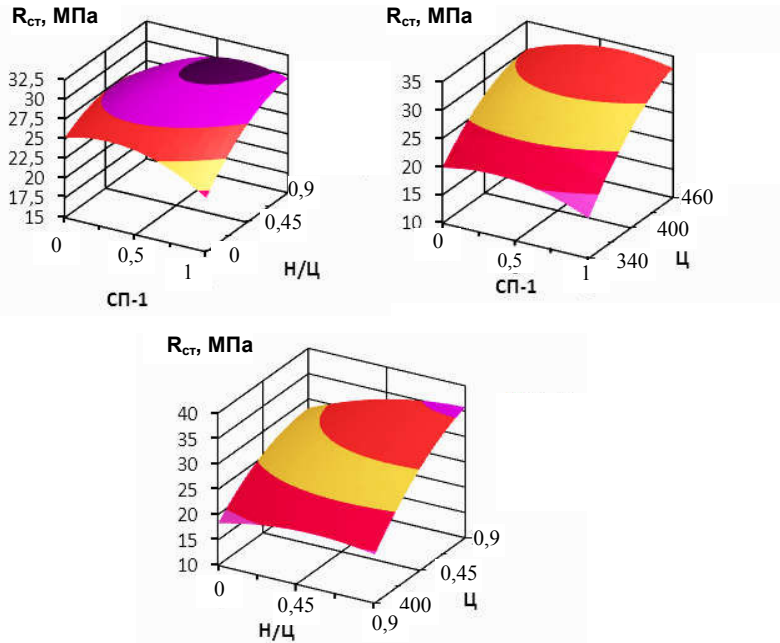


Рис. 5.2. Залежність міцності при стиску у віці 28 діб цементно-піщаного розчину з аспіраційним пилом від досліджуваних факторів

Комплексне застосування аспіраційного пилу та суперпластифікатора дає можливість збільшити міцність на 10...20% порівняно з непластифікованими наповненими розчинами та на 20...30% у порівнянні з пластифікованими розчинами без наповнювачів.

При формуванні структури розчину важливе значення має міцність контактних шарів цементного каменю із заповнювачем. З позиції сучасних уявлень фізико-хімічної механіки [192-194] міцність цементного каменю в контактних шарах на границі із зернами кварцового піску в 1,5 рази і більше перевищує міцність каменю в об'ємі. При цьому вплив контактних шарів на міцність розчину збільшується зі зближенням зерен наповнювачів, тобто міцність залежить від співвідношення розмірів контактного шару та

відстані між зернами, а також від об'ємної концентрації дрібного заповнювача. Звідси випливає, що збільшення кількості цементного тіста з певного моменту починає негативно позначатися на структурі та міцності розчину.

З рівнянь (5.2 5.4) можна відзначити, що зі збільшенням вмісту цементного тіста та добавки суперпластифікатора збільшується рухомість суміші, а збільшення цементно-водного відношення та ступеня наповнення призводить до зменшення розпливу конуса. При збільшенні витрати добавки та ступеня наповнення компенсується вплив останнього фактора на параметри рухомості розчину.

На рис. 5.3 представлена ізопараметрична діаграма рухомості розчинів, що містять АГП та суперпластифікатор СП-1. З діаграми видно, що ефективність застосування суперпластифікатора зі збільшенням рівня наповнення падає.

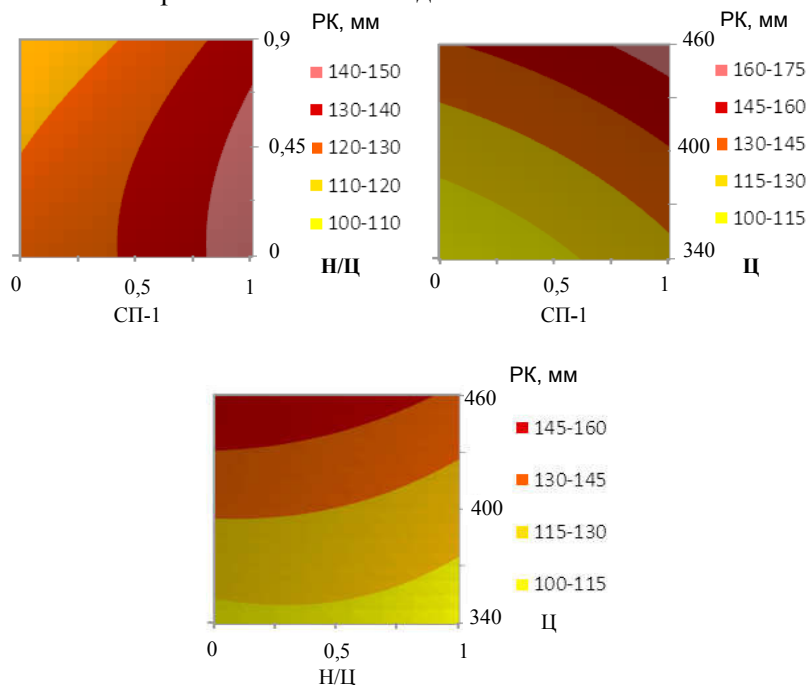


Рис. 5.3. Залежність розпливу конуса розчинової суміші з пластифікатором СП-1, наповненої аспіраційним пилом від досліджуваних факторів

Найбільше погіршення рухомості розчинових сумішей, як показує аналіз рівнянь (5.2) та (5.4), відбувається при збільшенні витрати цементу і наповнювача разом з підвищенням Ц/В. Через негативний знак більшості квадратичних ефектів у рівняннях (5.2) та (5.4) можна зробити висновок про наявність зони оптимуму розпливу конуса суміші з наповнювачем (рис. 5.3).

Оптимальним ступенем наповнення можна вважати 0,5...0,65 при застосуванні СП-1. Цей оптимум зберігається при різних значеннях Ц/В, з підвищенням витрати цементу спостерігається тенденція до його зменшення не більше ніж на 0,05...0,1, що підтверджується відомими даними [75; 195].

Аналіз отриманих залежностей дозволяє стверджувати, що спільне введення до складу розчину аспіраційного пилу та суперпластифікаторів у всіх випадках є ефективним методом підвищення міцності при заданій рухомості розчинової суміші та зниження витрати цементу в розчині.

5.3. Вплив дисперсності АГП на властивості цементних розчинів

Для дослідження впливу дисперсності АГП на властивості цементних розчинів було проведено запланований експеримент за планом В4.

Як варійовані фактори прийняті:

x_1 – витрата цементу, кг на м³ розчину;

x_2 – вміст суперпластифікатора СП-1, % від маси цементу;

x_3 – вміст АГП, (m_{016} , %);

x_4 – питома поверхня частинок АГП S_{016} , см²/г.

Підвищення питомої поверхні частинок АГП здійснювалося шляхом змішування аспіраційних гранітних пилів середньої (2300 см²/г) та високої дисперсності (4700 см²/г). Рухомість розчинової суміші контролювалася виміром зануренням стандартного конуса і в усіх точках плану підтримувалася лише на рівні 6...8 см. Умови планування експериментів наведено у табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Умови планування експериментів при
отриманні рівнянь 5.6..5.9

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральні	Кодовані	-1	0	1	
1.	Витрата цементу, кг/м ³	x_1	200	350	500	150
2.	Вміст суперпластифікатора СП-1, % від Ц	x_2	0	0,6	1,2	0,6
3.	Вміст АГП, ($m_{0,16}$, %)	x_3	0	12	24	12
4.	Питома поверхня частинок АГП, $S_{0,16}$, см ² /г	x_4	2300	3500	4700	1200

Експериментально-статистичні моделі вихідних параметрів (водо-цементного відношення (В/Ц), середньої густини розчину (г/см³), міцності при стиску (МПа) та при згині (МПа) у віці 28 днів наведені нижче:

$$\begin{aligned}
 B / Ц = & 0,62 - 0,28x_1 - 0,07x_2 + 0,17x_3 + 0,09x_4 + \\
 & + 0,11x_1^2 + 0,02x_2^2 - 0,04x_3^2 + 0,04x_4^2 + 0,005x_1x_2 - \\
 & - 0,11x_1x_3 - 0,08x_1x_4 - 0,05x_2x_3 - 0,01x_2x_4 - \\
 & - 0,06x_3x_4;
 \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned}
 \rho_0 = & 2,12 + 0,09x_1 + 0,01x_2 + 0,07x_3 + 0,01x_4 + \\
 & + 0,13x_1^2 - 0,04x_2^2 - 0,06x_3^2 - 0,02x_4^2 - 0,01x_1x_2 - \\
 & - 0,03x_1x_3 - 0,01x_1x_4 + 0,05x_2x_3 - 0,02x_2x_4 + \\
 & + 0,02x_3x_4;
 \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned}
 R_{cm}^{28} = & 33,96 + 9,94x_1 + 2,71x_2 + 2,78x_3 - 4,4x_1^2 - \\
 & - 2,15x_2^2 - 5,06x_3^2 - 4,61x_4^2 + 1,59x_1x_2 - 1,4x_1x_3 - \\
 & - 0,82x_1x_4 + 1,99x_2x_3 + 0,27x_2x_4 - 0,5x_3x_4;
 \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned}
 R_{3e}^{28} = & 8,857 + 2,62x_1 + 0,99x_2 + 0,3x_3 - 0,11x_4 - \\
 & - 1,65x_1^2 - 0,39x_2^2 - 0,544x_3^2 + 0,52x_1x_2 + \\
 & + 0,19x_1x_3 - 0,18x_1x_4 + 0,8x_2x_3 - 0,14x_3x_4.
 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Водопотреба розчинової суміші оцінювалася за В/Ц до досягнення заданої рухомості. Показник В/Ц був у межах 0,4...1,4. Витрати води коливалися в межах від 100 до 330 л/м³. Графіки залежності В/Ц від досліджуваних факторів представлені рис.5.4...5.11. Аналізуючи вплив факторів слід зазначити, що найбільший лінійний вплив на В/Ц створює фактор x_1 (витрата цементу), близький до нього – фактор x_3 (вміст АГП). Якщо зміна фактора x_1 при переході з нижнього на верхній рівень варіювання викликає зниження В/Ц, вплив фактора x_3 , як слід очікувати, істотно підвищує водопотребу розчину. У свою чергу, додаткове підвищення водопотреби викликає збільшення фактора x_4 (питомої поверхні гранітного наповнювача).

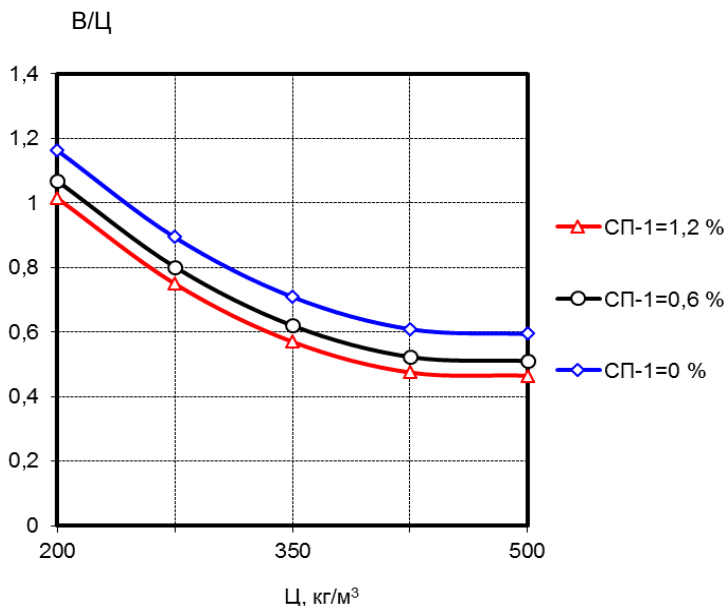


Рис. 5.4. Залежність В/Ц від витрати цементу та суперпластифікатора

Фактор x_2 (вміст суперпластифікатора) деякою мірою компенсує негативний вплив дисперсних частинок, проте, як видно з абсолютних величин відповідних ефектів, цієї компенсації в даному випадку недостатньо. Найбільш важливими взаємодіями факторів у цій моделі є ті, що можуть знизити водопотребу при

постійній витраті цементу. Так, суттєвий негативний ефект b_{23} свідчить про деяку компенсацію збільшення водопотреби, спричиненої підвищеною кількістю дисперсних частинок, за рахунок суперпластифікатора. Взаємодія факторів x_2 і x_4 значно менше, – розріджувального ефекту нафталінформальдегідного суперпластифікатора недостатньо, щоб переkritи вплив на водопотребу дисперсного граніту з питомою поверхнею $4700 \text{ см}^2/\text{г}$.

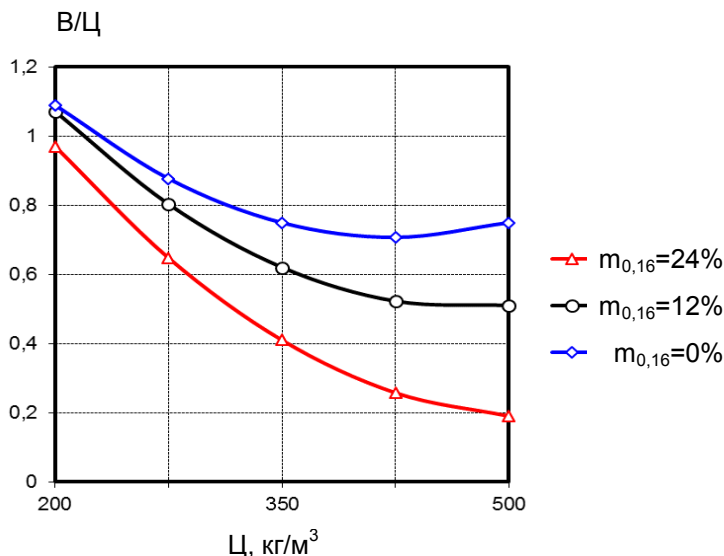


Рис. 5.5. Залежність В/Ц від витрати цементу та вмісту АГП ($m_{0,16}$ – маса частинок менше 0,16% маси цементу)

Ще одним показником, що характеризує властивості розчинових сумішей з гранітним пилом, є середня густина розчинової суміші після ущільнення. При постійній витраті цементу найбільш впливовим фактором, що сприяє ущільненню, є підвищення вмісту дисперсних частинок АГП (x_3). Деяке ущільнення спостерігається також за рахунок збільшення вмісту добавки-суперпластифікатора та дисперсності гранітного пилу (x_2 , x_4). Значні негативні квадратичні ефекти свідчать про екстремальний характер залежностей. Збільшення вмісту дисперсних частинок вище 10...12% знижує щільність, ймовірно, через підвищення водовмісту сумішей.

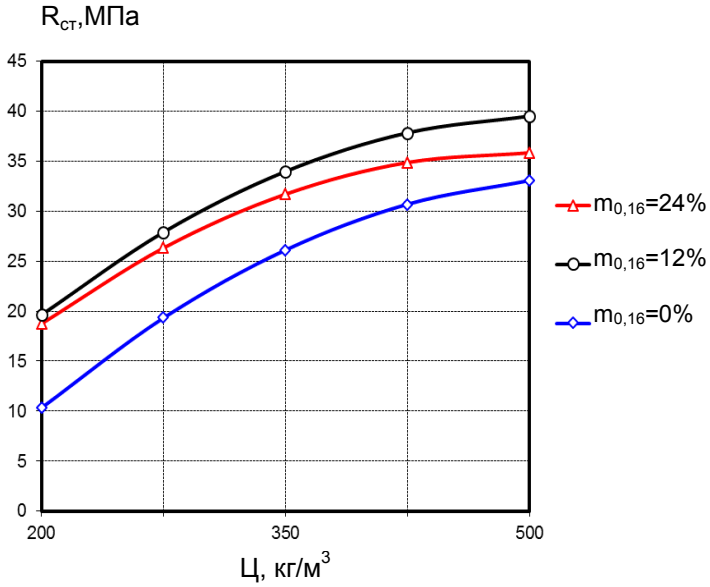


Рис. 5.6. Вплив витрати цементу та вмісту дисперсних частинок на міцність розчину при стиску у віці 28 діб

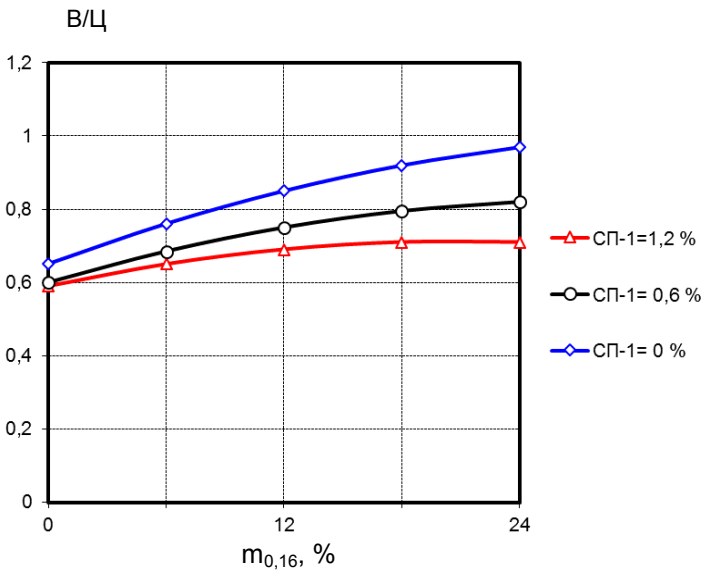


Рис. 5.7. Залежність В/Ц від витрати цементу та суперпластифікатора

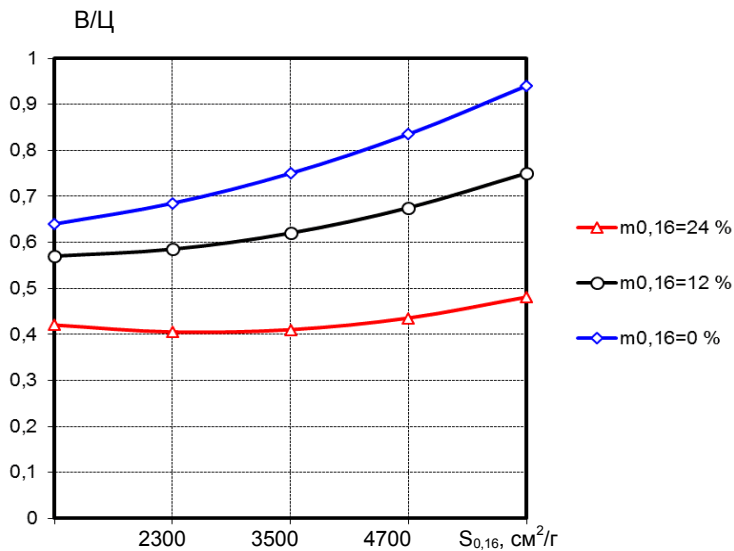


Рис. 5.8. Залежність В/Ц від вмісту АГП та його питомої поверхні

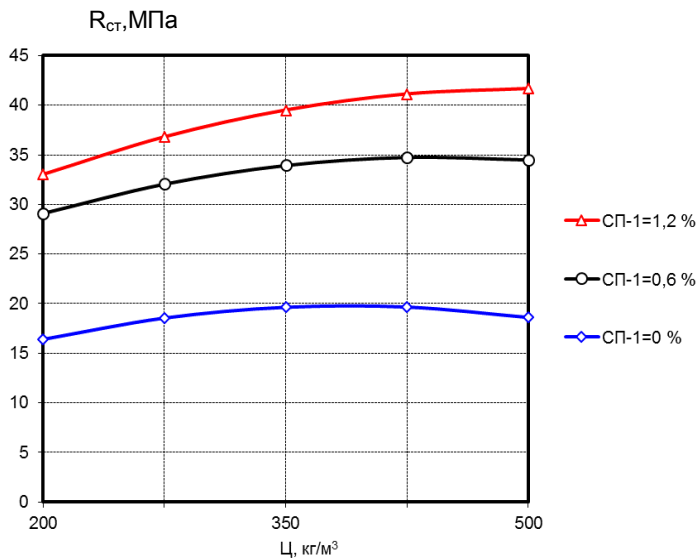


Рис. 5.9. Вплив витрати цементу та суперпластифікатора на міцність розчину при стиску у віці 28 дів

Найбільший вплив на міцність з факторів, що варіюються, має витрата цементу (x_1), що спричиняє відповідну зміну В/Ц. При постійній витраті цементу фактори x_2 і x_3 (вміст суперпластифікатора і частинок менше 0,16 мм) сприяють підвищенню міцності рівною мірою, причому звертає на себе увагу наявність у моделі (5.8) також суттєвого позитивного коефіцієнта взаємодії цих факторів. Підвищення вмісту дисперсних частинок наповнювача з одночасним введенням суперпластифікатора сприяє підвищенню міцності. Присутність у рівнянні (5.8) значних квадратичних ефектів даних факторів свідчить про наявність порогових значень даних факторів, після досягнення яких міцність починає знижуватися. Це особливо помітно для фактора x_3 (зміст дисперсних частинок аспіраційного пилу). Збільшення питомої поверхні гранітного наповнювача призводить до зростання В/Ц. При вмісті частинок пилу до 12% від маси заповнювача спостерігається їх позитивний вплив на міцність при стиску, а подальше збільшення кількості пилу призводить до зменшення міцності.

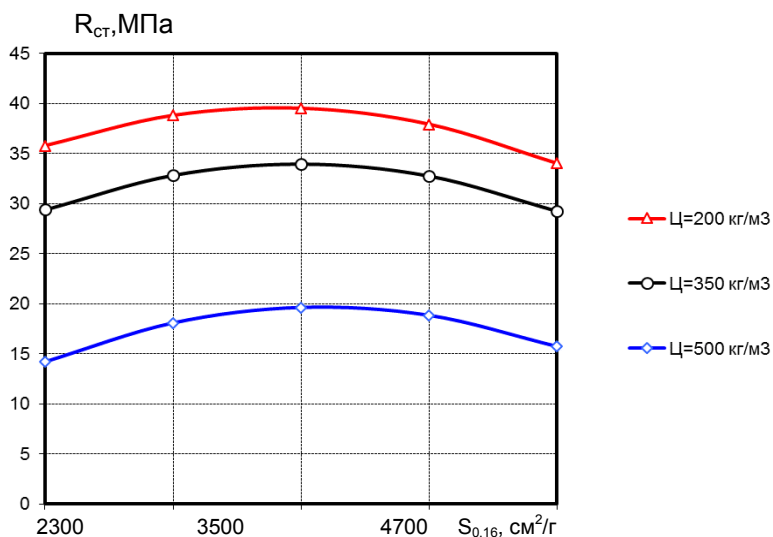


Рис. 5.10. Вплив витрати цементу та питомої поверхні АГП на міцність при стиску у віці 28 діб

Підвищення дисперсності АГП спричиняє деяке підвищення міцності розчину (не більше 15...20%), попри підвищення В/Ц. Максимальна питома поверхня, що спричиняє зростання міцності, знаходиться в межах 3200...3500 $\text{см}^2/\text{г}$. Основною умовою позитивного впливу дисперсних частинок, що найбільше сприяє структуроутворенню цементного каменю, є розріджуюча дія добавки суперпластифікатора. Це підтверджує присутність у моделі (5.8) позитивного ефекту взаємодії цих факторів.

Позитивний вплив частинок АГП на міцність розчину пов'язаний також із їх впливом на середню густину. Підвищена пустотність піску за відсутності пилоподібного наповнювача спричиняє виникнення значного розшарування розчинової суміші, особливо при низьких витратах цементу та високій рухомості. При такому поєднанні факторів мінімальна середня густина розчину становить близько 1900 $\text{кг}/\text{м}^3$, міцність при стиску відповідно 1...3 МПа.

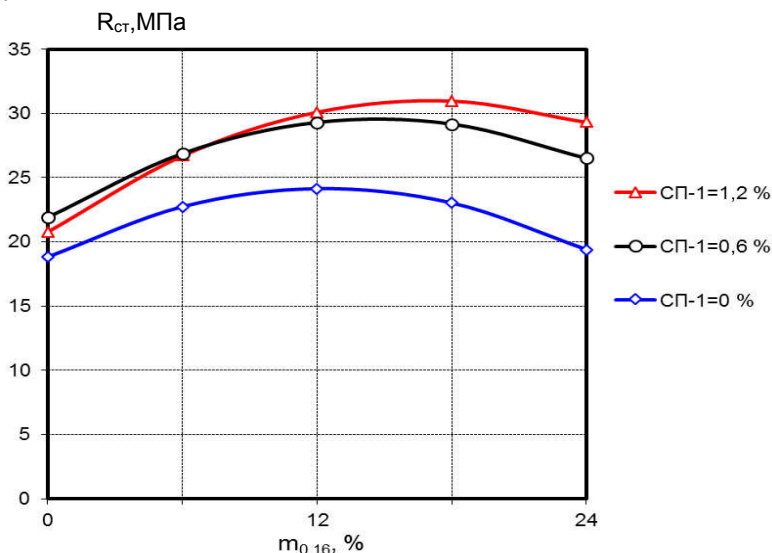


Рис. 5.11. Вплив суперпластифікатора та вмісту дисперсних частинок на міцність при стиску у віці 28 діб.

При низьких витратах цементу пилюватий гранітний наповнювач збільшує об'єм цементного тіста, однорідність та зв'язність суміші, забезпечуючи щільну та однорідну структуру

розчину. У таких умовах міцність при стиску підвищується до 10...15 МПа.

Максимальна міцність розчину при оптимальному поєднанні факторів становить 40...42 МПа, за відсутності гранітного наповнювача – 30...32 МПа.

Отримані результати підтвердили можливість використання аспіраційного гранітного пилу як наповнювача сухих будівельних сумішей та цементних розчинів на їх основі та показали можливість позитивного впливу частинок АГП на міцність за умови нейтралізації їх негативного впливу на водопотребу за рахунок добавки суперпластифікатора.

5.4. Мурувальні розчини на основі сухих будівельних сумішей з використанням гранітного аспіраційного пилу високої дисперсності (ГАПВД)

З метою вивчення впливу факторів складу на міцнісні характеристики мурувальних розчинів на основі ГАПВД, а також встановлення оптимальних параметрів виготовлення розчинових сумішей основні дослідження були виконані з застосуванням математичного планування експерименту. Для цього було реалізовано тривірневий чотирифакторний план B_4 [168], умови планування якого наведені у табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Умови планування експериментів при отриманні рівнянь 5.14 та 5.16

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		Кодовані	-1	0	
Вміст цементу, кг/м ³	X_1	150	200	250	50
Вміст добавки ГАПВД, кг/м ³	X_2	50	75	100	25
Вміст добавки СП-1, % від маси цементу	X_3	0,3	0,4	0,5	0,1
Вміст ефіру целюлози (ЕЦ), %	X_4	1,0	1,5	2	0,5

Матриця планування та експериментальні результати наведено в табл.5.6.

Як вихідні параметри вибрали міцність при стиску та згині, а також адгезійну міцність розчинів, що містять від 50 до 100 кг ГАПВС. Рухомість розчинових сумішей складала 10 см.

Після обробки та статистичного аналізу експериментальних даних отримали рівняння регресії міцності мурувальних розчинів, наведені в табл. 5.7.

Таблиця 5.6

Матриця планування та результати досліджень з визначення міцності мурувальних розчинів на основі СБС

№ з/п	Фактори впливу				Міцність, МПа		Адгезійна міцність $R_{ад}$, МПа
	Ц, кг	ГАПВД, кг	СП, %	ЭЦ, кг	на стиск $R_{ст}$, МПа	на згин $R_{зг}$, МПа	
1.	250	100	1,5	2,50	16,4	4,9	0,66
2.	250	100	1,5	1,25	18,6	5,1	0,74
3.	250	100	0,9	2,50	13,5	3,8	0,54
4.	250	100	0,9	1,25	15,3	3,8	0,61
5.	250	50	1,5	2,50	11,84	4,9	0,46
6.	250	50	1,5	1,25	12,32	5,4	0,47
7.	250	50	0,9	2,50	12,48	5,5	0,48
8.	250	50	0,9	1,25	12,56	6,7	0,48
9.	150	100	1	1,50	14,6	4,8	0,58
10.	150	100	1	0,75	13,3	4,1	0,53
11.	150	100	0,6	1,50	9,5	2,7	0,38
12.	150	100	0,6	0,75	10,5	2,2	0,42
13.	150	50	1	1,50	8,025	3,4	0,31
14.	150	50	1	0,75	6,825	2,8	0,26
15.	150	50	0,6	1,50	6	2,9	0,23
16.	150	50	0,6	0,75	7,65	3,2	0,29
17.	250	75	1,2	1,90	16	6,4	0,64
18.	150	75	0,8	1,10	10	1,6	0,40
19.	200	100	1	1,50	14,22	3,5	0,57
20.	200	50	1	1,50	12	3,2	0,46
21.	200	75	1,25	1,50	10,45	2,9	0,42
22.	200	75	0,75	1,50	10,23	3,2	0,41
23.	200	75	1	2,00	11,55	2,9	0,46
24.	200	75	1	1,00	11,22	3,5	0,45

Таблиця 5.7.

Статистичні моделі міцності мурувальних розчинів

Параметри	Статистичні моделі
Міцність на стиск у віці 28 діб	$R_{cm}=12+2,39X_1+2,03X_2+0,82X_3-0,25X_4+0,97X_1^2+1,08X_2^2-1,69X_3^2-0,64X_4^2-0,3X_1X_2-0,24X_1X_3-0,28X_1X_4+0,86X_2X_3-0,17X_2X_4+0,27X_3X_4 \quad (5.10)$
Міцність на згин у віці 28 діб	$R_{z2}=3,2+1,06X_1-0,2X_2+0,2X_3-0,1X_4+0,8X_1^2+0,2X_2^2-0,1X_3^2-0,04X_4^2-0,4X_1X_2-0,22X_1X_3-0,21X_1X_4+0,52X_2X_3+0,16X_2X_4+0,11X_3X_4 \quad (5.11)$
Адгезійна міцність	$R_{ao}=0,48+0,09X_1+0,09X_2+0,03X_3-0,01X_4+0,04X_1^2+0,03X_2^2-0,07X_3^2-0,0X_4^2-0,01X_1X_2-0,01X_1X_3-0,01X_1X_4+0,03X_2X_3-0,007X_2X_4+0,01X_3X_4 \quad (5.12)$

Графічні залежності міцності мурувальних розчинів з використанням гранітного аспіраційного пилу високої дисперсності (ГАПВД) від факторів складу наведені на рис. 5.12.

Аналіз отриманих рівнянь і графіків показує, що в досліджених мурувальних розчинах визначальний вплив на міцність при стиску має витрата цементу. Наступним за значимістю фактором є кількість гранітного аспіраційного пилу високої дисперсності (ГАПВД). Помітну роль також відіграє вміст суперпластифікатора, вплив якого є екстремальним. Для всіх досліджених складів близьким до оптимального є вміст ГАПВД 75 кг. Найбільший вплив пилу спостерігається для розчинів із підвищеною кількістю суперпластифікатора.

При постійній рухомості збільшення вмісту суперпластифікатора СП-1 у складі розчину призводить до збільшення міцності при підвищеній витраті пилу. Зокрема, зі збільшенням вмісту СП-1 від 0,3 до 0,4%, міцність розчину на стиск зростає на 26...32% при максимальному вмісті ГАПВД, і на 15...22% при помірній витраті пилу.

Збільшення вмісту водоутримуючої добавки призводить до зниження міцності на 10...15%. Найбільш помітне зниження міцності спостерігається при вмісті добавки Tylose (ЕЦ) понад 1,5%.

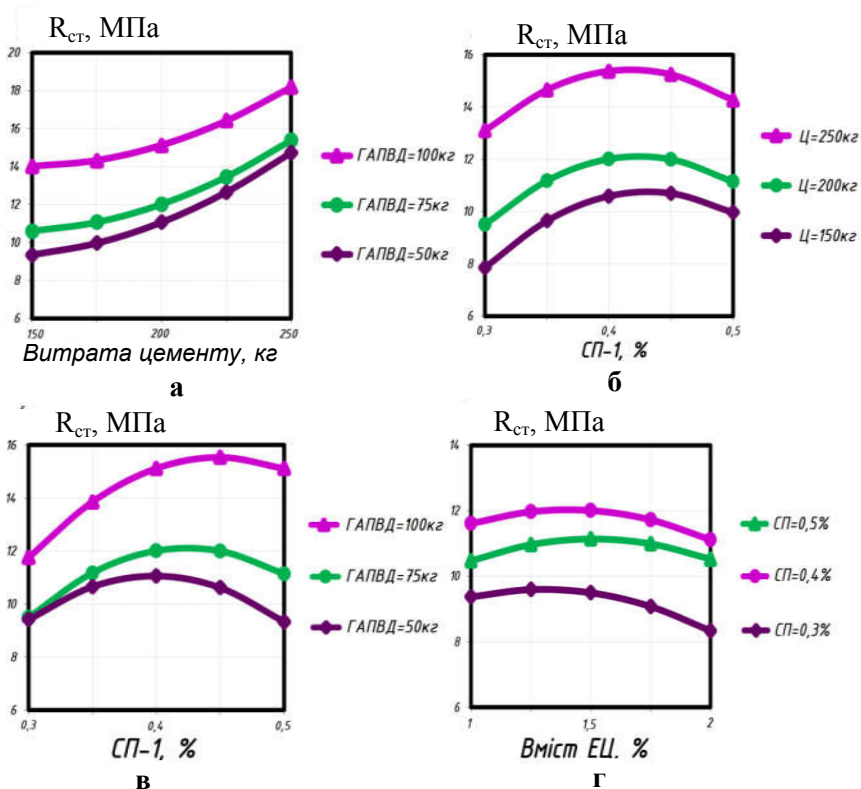


Рис. 5.12. Залежність міцності розчинів на стиск з добавкою ГАПВД від факторів складу

Найбільшу міцність ($R_{ct}=18,6$ МПа) мають мурувальні розчини з витратою 75 кг гранітного аспіраційного пилу високої дисперсності при вмісті 250 кг портландцементу, 0,4% мас.цем. добавки суперпластифікатора та 0,15% ефіру целюлози.

Графічні залежності адгезійної міцності мурувальних розчинів з використанням ГАПВД від факторів складу наведені на рис. 5.13.

Аналіз отриманих моделей (табл. 5.7) показує, що в діапазоні варіювання досліджуваних факторів величина адгезійної міцності розчинів, що містять гранітний пил, коливається в межах 0,28...0,84

МПа, що більше за величину нормованої адгезійної міцності для мурувальних розчинів, яка має бути не менше 0,2 МПа.

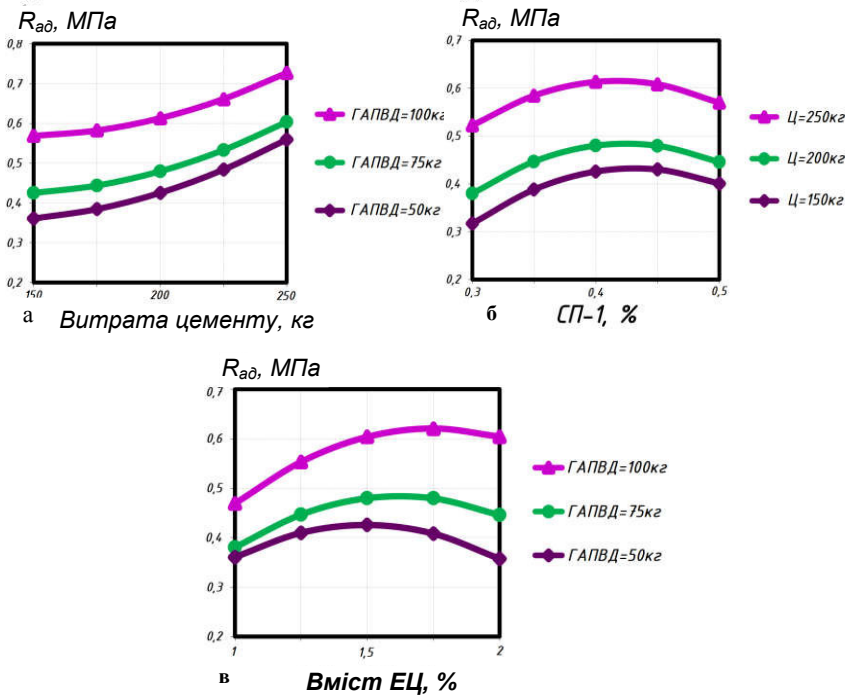


Рис. 5.13. Графічні залежності адгезійної міцності мурувальних розчинів у віці 28 діб з використанням гранітного аспіраційного пилу від факторів складу:
 а – від витрати цементу та вмісту ГАПВД;
 б – від витрати цементу та СП-1;
 в – від вмісту добавки ЕЦ та вмісту ГАПВД

Відомо, що нові свіжоутворені поверхні мінеральних матеріалів мають значно вищі значення поверхневої енергії, що зумовлює їхню високу хімічну активність і сприяє високій адгезійній міцності при контакті їх з в'язучим. Однак, необхідно враховувати схильність тонкодисперсних порошоків до швидкої дезактивації. Тривалість існування у повітряному середовищі

радикалів, що виникають при механо-хімічній обробці, становить лише $10^{-3} \dots 10^{-6}$ с.

Досліджувані фактори за спадаючим впливом на величину адгезійної міцності можна розмістити у наступний ряд: ГАПВД=Ц>СП>ЕЦ. Збільшення вмісту пилу з 50 до 75 кг за інших рівних умов дозволяє підвищити адгезійну міцність розчину на 10...15% (рис. 5.13), а при подальшому збільшенні кількості ГАПВД до 100 кг зростання міцності досягає 25...30%. Введення суперпластифікатора нафталін-формальдегідного типу СП-1 при помірному дозуванні до 0,4% позитивно впливає на адгезійні характеристики. Можна відзначити суттєвий вплив ефектів взаємодії таких факторів, як вміст суперпластифікатора та ГАПВД, портландцементу та гранітного пилу. Очевидно, що досягнення високої адгезійної міцності розчинів можливе при відповідній оптимізації складу розчину.

Найвищі показники адгезійної міцності віком 28 діб досягаються при вмісті в розчині 100 кг ГАПВД. Використання водоутримуючої добавки – ефіру целюлози, позитивно впливає на адгезійні показники розчинів кладок при помірних дозуваннях (близько 1,25-1,75%).

Таким чином, експериментально обґрунтовано можливість отримання мурувальних розчинів на основі сухих будівельних сумішей при використанні гранітного аспіраційного пилу високої дисперсності з поліпшеними експлуатаційними властивостями.

6. БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ

6.1. Реакційно-порошкові бетони як напівфабрикат для виготовлення сухих будівельних сумішей (СБС) для розчинів різного призначення

При зведенні будівель і споруд виникає необхідність в сумішах різного призначення. Виготовлення таких сумішей можливе централізовано на заводах або безпосередньо на будівельних майданчиках з застосуванням напівфабрикатів. В якості такого напівфабрикату може бути використаний реакційно-порошковий бетон (РПБ). РПБ – можна розглядати, як суху суміш, що містить в'язуче (портландцемент), дисперсний наповнювач (дрібний пісок, зола та інші) і суперпластифікатор, а також добавки-модифікатори (мікрокремнезем, метакаолін та інші). Ці суміші забезпечують високу міцність, адгезійну здатність та довговічність бетонів та розчинів у різних умовах експлуатації. Коректуючи склади РПБ різними компонентами можна досягати властивостей сухих сумішей, розчинів та бетонів різного призначення.

У відповідності з результатами наших досліджень [241] доступними і ефективними є склади РПБ, що наведені в табл. 6.1.

В сухі суміші доцільно вводити поліакрилатні або полікарбоксилатні суперпластифікатори зокрема «Melflux 2651F».

На основі пропонованих складів РПБ можливим є отримання сухих будівельних сумішей різного складу та функціонального призначення. Зокрема:

- сумішей для захисного («бронювального») шару конструкцій,
- сумішей для ремонту та поновлення поверхонь та споруд (РМ1, РМ2, РМ3);
- мурувальних сумішей для улаштування теплозберігаючих огороджувальних конструкцій (МР 4);
- сумішей для улаштування стяжок та покриттів підлог (СТ1, СТ2, СТ3, ПО1, ПО2, ПО3);
- сумішей для штукатурення теплоізоляційними розчинами (ШТ3);
- гідроізоляційних сумішей для улаштування жорсткої, еластичної та гідроізоляції систем теплоізоляції (ГП1, ГП2, ГП3),

- сумішей для зведення споруд 3D-принтером та ін.

Таблиця 6.1

Типові склади РПБ та їх міцнісні характеристики

№	Склад, кг/м ³ *							СП	РК, см	Міцність РПБ, МПа					
	Ц	П	ГП	МП	ДГШ	З	Во да			на згин, у віці			на стиск, у віці		
										1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб
1	1000	1000	-	-	-	-	200	MELFLUX 2651 (0,5% від цемент)	25	9,2	30,5	30,5	57,2	71,4	98,0
2	900	1000	-	100	-	-	200		30	8,5	25,1	19,6	56,0	69,4	101,6
3	700	1000	-	300	-	-	200		30	9,8	20,9	14,9	47,0	72,8	96,4
4	900	1000	100	-	-	-	210		10	9,9	23,2	15,6	51,8	73,6	93,0
5	700	1000	300	-	-	-	200		25	9,2	23,9	12,5	40,2	70,2	90,2
6	900	1000	-	-	100	-	200		15	9,2	23,4	22,3	51,8	92,6	98,4
7	700	1000	-	-	300	-	200		30	8,8	17,6	20,3	37,4	90,0	102,0
8	900	1000	-	-	-	100	200		30	9,5	21,6	14,5	46,6	79,0	87,2
9	700	1000	-	-	-	300	200		30	7,6	17,1	13,3	36,8	77,0	99,0

* - Ц – портландцемент, П – пісок фракції 0.16...1,25, ГП – гранітний аспіраційний пил, МП – мелений пісок, ДГШ – доменний гранульований шлак, З – зола-виносу.

Вимоги до перерахованих сумішей, для яких за ДСТУ нормуються властивості, наведені в табл. 6.2.

Як вихідні матеріали для отримання СБС, крім РПБ, були використані:

- кварцовий пісок фракції 0,16...1,25, Славутського кар'єру (Хмельницька обл.) з модулем крупності $M_{кр} - 1,6...1,9$;
- керамзит Яворівського заводу будівельних матеріалів, фракція 0...5 мм, насипна густина 690 кг/м³, водопоглинання – 14,5%, міцність при стиску у циліндрі – 3,6 МПа;
- перлітовий пісок фракція 0,16...1,25 мм, насипна густина 95 кг/м³;
- спінені полістирольні гранули ТзОВ ПП «Ізотерм-С» розміром 3...5 мм, насипна густина 10,5 кг/м³; густина зерен – 15,5 кг/м³;
- суперпластифікуюча добавка «Melflux 2651F»;
- редиспергований полімерний порошок (РПП);
- Neolith P 4400 (вініловий ефір версатісної кислоти) FAR SPA (Італія);
- Dairen DA 1400 (сополімер – вінілацетат-етилен) DCC (Тайвань);
- ПВА – полімер вінілацетату.

Таблиця 6.2

Вимоги до розчинових сумішей та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показників для сумішей													
	MP4	CT1	CT2	CT3	ПО1	ПО2	ПО3	PM1	PM2	PM3	ШТЗ	П1	П2	П3
Сухі суміші														
Крупність заповнювача, мм, не більше	2,5	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	4,0	2,5	1,25	1,25	1,25	0,63	0,63	0,63
Розчинові суміші														
Рухомість, см, не менше	6	8	8	8	-	-	-				8			
Розтічність, см, не менше	-	-	-	-	17	17	-				-			
Термін придатності, хв, не менше	60	20	20	20	20	20	-	30	30	30	60	60	120	120
Розчини														
Міцність зчеплення після витримання в повітряно-сухих умовах, МПа, не менше	0,2	0,2	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	2,0	2,0	0,8		1,0	0,5	0,08 ПТ*; 0,015 МВ*
Границя міцності на стиск, МПа, не менше: -через три доби -через 28 діб	5	5 15	5 20	10 35	7 25	10 35	20 50	5,0 35,0	6,0 30,0	4,0 20,0	2,5	12	-	4

Продовження табл.6.2

Назва показника	Значення показників для сумішей													
	MP4	CT1	CT2	CT3	PO1	PO2	PO3	PM1	PM2	PM3	ШТЗ	П1	П2	П3
Границя міцності на розтяг при згині через 28 діб, МПа, не менше		3,5	4,5	6,0	5,0	5,0	7,0	5,0	5,0	5,0	1,2			
Стираність, г/см ² , не більше		-	-	-	0,7	0,7	0,7							
Усадка, мм/м, не більше		2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,2	1,2	2,0		2	-	-
Морозостійкість, цикли, не менше	25-75	-	-	50	-	75	75	75	75	-		50	50	50
Теплопровідність, Вт/(м·К), не більше	0,35										0,3			
Водопоглинання за 24 год, кг/м ² , не більше											0,8	-	-	0,6
Паропроникність, мг/м·год·Па, не менше											0,1	0,03	-	0,1 МВ;* 0,04 ПП*
Тріщиностійкість	Відсутність тріщин на шарі товщиною, яка дорівнює максимально рекомендованій товщині нанесення за один прохід													

6. 2. Дослідження впливу виду редиспергованого полімеру на властивості СБС

При замішуванні сухої суміші у воді редисперговані полімерні порошки перетворюються в клейову полімерну дисперсію, яка при затвердінні розчину створює "гумові містки" в його порах і на межі з основою. Вони мають міцність при розриві не менше 5 МПа [1] і еластично армують цементний камінь, а також здатні не тільки суттєво збільшити адгезію розчинів до основи, але і значно згладити такі недоліки цементного каменю, як підвищену крихкість, низьку граничну розтяжність, схильність до утворення тріщин, малий опір динамічним навантаженням. Варто відзначити, що полімер хімічно не взаємодіє з в'язкими і іншими компонентами, а лише виконує роль гнучких зв'язків, надаючи штучному каменю підвищену еластичність. За допомогою дисперсних порошоків сухим сумішам надаються і деякі спеціальні властивості [2,3].

На першому етапі дослідження проводили порівняння впливу редиспергованих полімерних порошоків (РПП) різної природи: Neolith P 4400 (вініловий ефір версатієвої кислоти), Dairen DA 1400 (сополімер - вінілацетат-етилен) та ПВА. При цьому розчини отримували шляхом перемішування суміші РПБ, піску, полімеру та води. Склад РПБ в даному і послідовних дослідженнях був наступний: ПЦ-I – 35%, зола-виносу – 15%, пісок фр. 0,16...1,25мм – 50%, суперпластифікатор MELFLUX 2651F 0,5% (від маси цементу). Частка полімеру складала 0, 10 та 20% від маси РПБ, В/Ц було сталим в кожній точці та становило 0,48. Склади досліджуваних СБС на основі РПБ з використанням РПП приведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

Склади досліджуваних сумішей на основі РПБ

№	Тип полімеру	Склад сухої суміші, % мас			Вода замішування, %
		РПП	РПБ	Пісок	
1	-	0	50	50	12
2	Neolith P	2,5	50	47,5	12
3	4400	5,0	50	45	12

Продовження табл.6.3

№	Тип полімеру	Склад сухої суміші, % мас			Вода замішування, %
		РПП	РПБ	Пісок	
4	Dairen	2,5	50	47,5	12
5	DA 1400	5,0	50	45	12
6	ПВА	2,5	50	47,5	12
7		5,0	50	45	12

Рухомість розчинових сумішей визначали за зануренням стандартного конусу, границю міцності на розтяг при згині та границю міцності на стиск розчину визначали у віці 1, 3 та 28 діб, при використанні зразків призм розміром (40x40x160мм), які тверднули у повітряно-сухих умовах. Отримані експериментальні результати приведені в табл. 6.4 та на рис. 6.1...6.3.

Таблиця 6.4

Результати випробувань впливу РПП на властивості розчинів

№	ЗК, см	Міцність при згині, МПа, у віці			Міцність при стиску, МПа, у віці		
		1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб
1	6,0	2,8	6,1	8,4	6,2	25,9	40,2
2	11,0	2,4	6,8	9,0	5,4	18,4	37,4
3	13,0	1,9	6,3	10,1	4,2	15	32,6
4	10,0	2,2	6,5	8,8	4,9	18,4	36,6
5	12,0	1,6	5,9	9,8	3,8	15	32,2
6	11,5	2,1	6,2	8,8	4,6	18,4	37,0
7	13,5	1,6	5,1	9,2	3,4	15	31,8

Аналізуючи отримані результати можна прийти до висновків, що введення РПП спричиняє значне збільшення рухомості розчинової суміші по зануренню конуса (ЗК) з 6 см до 10...11,5 см при постійній водопотребі та вмісті полімеру 2,5% від маси суміші. При подальшому підвищенні кількості РПП та ПВА до 5% спостерігаємо незначне збільшення рухомості до 12...13,5 см (рис.6.1).

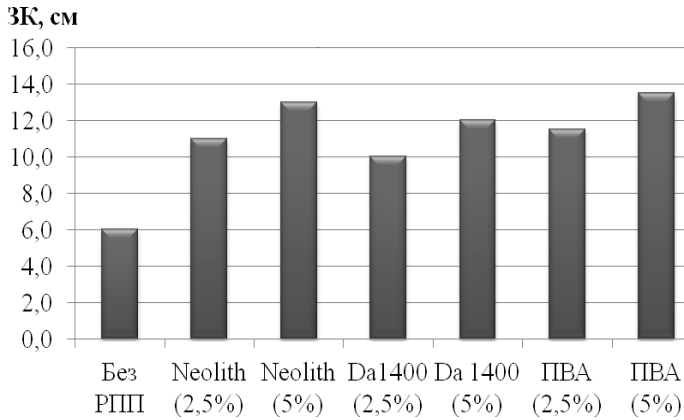


Рис. 6.1. Рухомість розчинів при використанні РПП

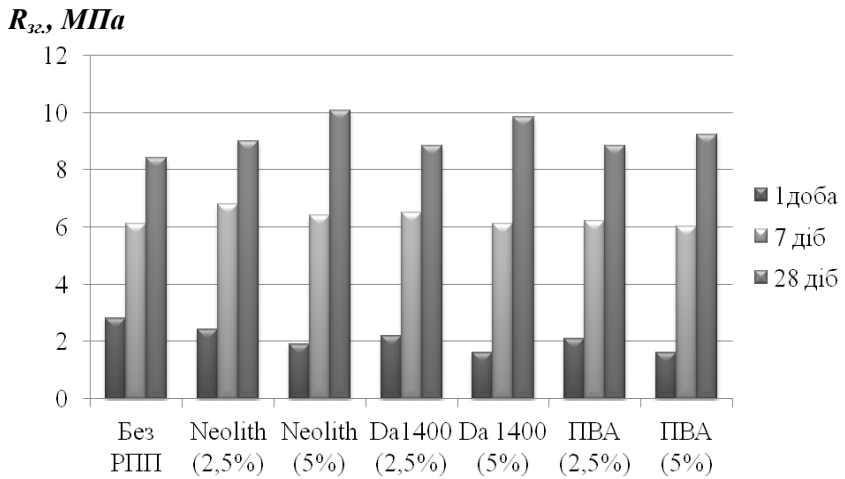


Рис. 6.1. Міцність розчинів на згин ($f_{m, tp}$) при використанні РПП

$R_{cm},$
МПа

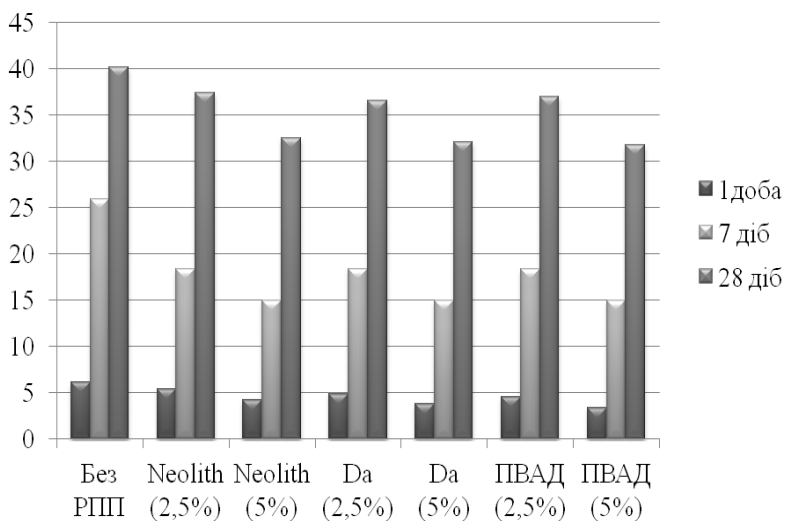


Рис. 6.2. Міцність розчинів на стиск (f_m) при використанні РПП

Полімерні порошки мають неоднозначний вплив на міцність як на стиск так і на згин у різні терміни твердіння. Згідно отриманих даних (табл. 6.4. та рис. 6.2, 6.3) введення полімерів усіх видів уповільнює твердіння на ранніх стадіях, як при згині так і при стиску. Причому при наближенні до 28 добового віку РПП чинять позитивний вплив. Міцність при згині у віці 28 діб зростає у порівнянні з складом без полімерної добавки на 8...12% при частці РПП 2,5% та на 8...12% і 10...15% у віці 7 та 28 діб відповідно при збільшенні добавки до 5%. Найвищі результати (10,1 МПа) отримані при використанні РПП Neolith P 4400 у кількості 5% від маси СБС.

Вплив РПП на міцність при стиску є дещо іншим. Характерним здебільшого є негативний вплив, при помірних дозуваннях (до 2,5%) в віці 28 діб міцність падає на 7...10%. За подальшого зростання вмісту полімеру (до 5%) в композиції міцність останньої знижується на 16...20%. Вплив на ранню

міцність, у порівнянні з марочною, є більш вагомим і супроводжується суттєвим спадом міцності на 35...45% у порівнянні з зразком без полімерної добавки.

Подальші дослідження проводили з використанням РПП Neolith P 4400.

6. 3. Ремонтні суміші на основі РПБ

Під час експлуатації бетонні та залізобетонні конструкції і споруди піддаються дії агресивних середовищ, сейсмічним, ударним та іншим руйнівним впливам, які можуть викликати пошкодження і руйнування будівельних конструкцій [118, 119]. З кожним роком кількість бетонних і залізобетонних споруд, що руйнуються зростає, що призводить до необхідності створення методів і матеріалів для їх відновлення та захисту від агресивного навколишнього середовища.

Необхідність ремонту і захисту бетонних конструкцій визначається умовами експлуатації і термінами служби бетону, залізобетонних конструкцій і виробів.

Для збільшення терміну служби будівельних конструкцій застосовують дві групи методів захисту. До першої групи відносяться всі способи захисту поверхні будівельних конструкцій. До другої групи належать всі способи і методи по створенню більш довговічного матеріалу будівельних конструкцій.

В теперішній час для поверхневого захисту матеріали на мінеральній основі знаходять все більше застосування за рахунок їх переваг перед матеріалами на органічному в'язучому. Серед переваг мінеральних матеріалів слід відзначити такі якості, як високу міцність, морозостійкість, адгезію, паропроникність, стійкість до впливу агресивних середовищ і нескладну технологія нанесення.

Однак будівельні суміші на мінеральній основі мають певні недоліки у тому числі необхідність тривалого догляду за твердіючою сумішшю (протягом 10-14 діб), що призводить до додаткових трудових і енергетичних витрат; неможливість їх використання при термінових ремонтних роботах.

Для усунення перерахованих вище недоліків ремонтних та захисних матеріалів на мінеральній основі були запропоновані склади СБС на основі реакційно-порошкових бетонів.

Отримання необхідних складів сухих будівельних сумішей виконувалося шляхом додавання до базової рецептури РПБ компонентів залежно від призначення та необхідних характеристик СБС.

Для вивчення впливу факторів складу сумішей на основні властивості будівельних розчинів були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до тривірневого трьохфакторного плану B_3 [198]. Умови планування експериментів наведені в табл. 6.5.

Таблиця 6.5

Умови планування експериментів при дослідженні ремонтних сумішей на основі РПБ

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Вміст РПБ, кг/т	X_1	500	650	800	150
Вміст золи, кг/т	X_2	0	50	100	50
Вміст РПП, кг/т	X_3	0	10	20	10

Як вихідні параметри вибрано рухомість розчинової суміші, водопоглинання, усадку, міцність при стиску, згині у віці 1, 7 та 28 діб зразків, які тверднули у повітряно-сухих умовах та адгезійну міцність розчинів. Випробування проводили згідно з чинними нормативними документами.

Матриця планування та отримані експериментальні результати досліджень наведені в табл. 6.6 та табл. 6.7 відповідно. У ході досліджень в кожній точці виготовляли розчини на основі РПБ з постійно водопотребою, що становила 120 л/т сухої суміші.

Таблиця 6.6

Матриця планування досліджень ремонтних сумішей

Точка плану	Кодовані значення факторів			Склад розчину, кг/т				
	X ₁	X ₂	X ₃	РПБ	З	РПП	Пісок	Вода
1	1	1	1	800	100	0	100	120
2	1	1	-1	800	100	20	80	120
3	1	-1	1	800	0	0	200	120
4	1	-1	-1	800	0	20	180	120
5	-1	1	1	400	100	0	500	120
6	-1	1	-1	400	100	20	480	120
7	-1	-1	1	400	0	0	600	120
8	-1	-1	-1	400	0	20	580	120
9	1	0	0	800	50	10	140	120
10	-1	0	0	400	50	10	540	120
11	0	1	0	650	100	10	240	120
12	0	-1	0	650	0	10	340	120
13	0	0	1	650	50	0	300	120
14	0	0	-1	650	50	20	280	120
15	0	0	0	650	50	10	290	120
16	0	0	0	650	50	10	290	120
17	0	0	0	650	50	10	290	120

Таблиця 6.7

Експериментальні результати досліджень ремонтних
СБС на основі РПБ

Точка плану	ЗК, см	Густи- на ρ_0 , кг/м ³	Водо-погли-нання W, %	Міцність на згин, МПа, у віці діб			Міцність на стиск, МПа, у віці діб			Адге-зія, МПа
				1	7	28	1	7	28	
1	12,8	2320	0,9	6,29	14,52	18,7	41,4	51,4	73,1	2,49
2	8,4	2410	1,5	7,09	14,08	16,6	49,8	66,6	82,6	0,73
3	10,8	2230	2,1	5,49	12,1	16,8	28,8	39,2	59,9	2,19
4	5,4	2320	2,8	5,89	11,44	14,1	40,4	46,9	70,0	0,59

Продовження табл. 6.7.

Точка плану	ЗК, см	Густина ρ_0 , кг/м ³	Водопоглинання W, %	Міцність на згин, МПа, у віці діб			Міцність на стиск, МПа, у віці діб			Адгезія, МПа
				1	7	28	1	7	28	
5	14,3	2272	1,4	3,49	9,57	13,9	13,5	27,6	40,7	1,79
6	10,5	2350	3,5	5,89	7	7,4	32,2	33	46,6	0,41
7	13,5	2110	2,6	3,09	8,8	13,5	11,5	24,3	36,3	1,53
8	8,7	2200	3,9	5,09	6,1	6,4	20,8	35	42,8	0,33
9	10,5	2300	1,6	6,64	13,2	17,3	38,8	52,1	69,7	1,20
10	12,9	2223	2,7	4,84	8,69	11,1	18,8	28,2	39,9	0,55
11	12,2	2316	1,8	5,64	11,88	16	28,9	43	60,6	1,10
12	10,3	2160	3,0	4,84	10,78	14,5	23,1	39,7	52,1	0,90
13	11,8	2233	1,6	4,49	11,99	16,6	20,1	40,6	53,4	2,10
14	7,2	2330	2,7	5,89	10,12	12	36,8	42,6	61,4	0,40
15	10,9	2285	2,0	5,44	11,11	15,2	24,3	41	56,0	1,10
16	11,0	2280	2,2	5,5	11,55	15,2	25	41,2	57,3	0,95
17	10,5	2290	2,1	5,3	11,22	15,1	25,3	42	56,9	1,00

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати коефіцієнти рівнянь регресії рухомості, водопоглинання, середньої густини, міцності при стиску та згині, а також адгезійної здатності досліджуваних розчинових сумішей та розчинів, які наведені в табл. 6.8.

Рівняння регресії мають наступний загальний вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1 + b_{22}x_2 + b_{33}x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

Аналізуючи коефіцієнти рівнянь регресії рухомості сумішей по зануренню конуса (табл. 6.8) досліджені фактори можна розмістити по величині впливу в наступний спадаючий ряд $X_3 > X_2 > X_1$, також спостерігається несуттєвий вплив ефектів взаємодії цих факторів. При цьому підвищення вмісту РПП та золи має позитивний ефект, а збільшення кількості РПБ навпаки. Аналіз взаємодій коефіцієнтів рівнянь однозначно показує, що при збільшенні кількості РПБ в поєднанні зі зменшенням частки золи має місце деяке падіння рухомості.

Позитивно на рухомість розчинових сумішей впливає спільне збільшення витрат РПП і золи.

Таблиця 6.8

Коефіцієнти рівнянь регресії

Коефіцієнти	Рухо- мість ЗК, см	Середня густина розчину ρ_0 , кг/м ³	Водо- пог- ли- нан- ня, W, %	Міцність на згин, МПа, у віці			Міцність на стиск, МПа, у віці			Адге- зія, МПа
				1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб	
b ₀	10,87	2275	2,12	5,44	11,4	15,15	25,77	41,7	56	0,98
b ₁	-1,2	42,5	-0,53	0,9	2,40	3,12	10,24	11,81	14,9	0,26
b ₂	0,95	44,8	-0,53	0,4	0,78	0,74	4,12	4,66	4,25	0,1
b ₃	2,3	-44,5	-0,57	-0,7	0,70	2,30	-6,47	-3,10	-4,1	0,76
b ₁₁	0,76	0,51	0,02	0,3	-0,4	-0,99	2,44	-1,69	-1,24	-0,08
b ₂₂	0,34	-23,0	0,24	-0,20	-0,03	0,11	-0,36	-0,5	0,31	0,05
b ₃₃	-1,4	20,5	-0,03	-0,25	-0,3	-0,84	2,09	-0,25	1,41	0,3
b ₁₂	0,3	-16,5	-0,11	0,10	0,43	0,37	1,08	2,59	2,20	0,01
b ₁₃	0,13	-1,5	0,26	0,40	-0,37	-1,11	1,00	-2,10	-0,88	0,1
b ₂₃	-0,25	1,5	-0,09	-0,10	-0,04	-0,15	-0,78	-1,53	0,15	0,04

Вплив факторів складу на середню густина є дещо іншим. Вони всі мають практично однакову величину впливу, однак, якщо РПБ та зола при збільшенні їх частки викликають підвищення густини, то РПП – призводить до її зменшення. Це пояснюється залученням повітря в розчин в присутності порошку Крім того, рівномірно розподілене повітря надає пластифікуючого ефекту розчиновим сумішам, що в свою чергу призводить до збільшення рухомості.

Аналіз отриманих коефіцієнтів рівнянь міцнісних показників (табл. 6.8) показує, що у діапазоні варіювання досліджуваних факторів розчинів, які містять РПБ, як і слід було очікувати, найбільш помітний вплив чинять витрати РПБ та полімерного порошку. Спостерігається суттєвий вплив ефектів взаємодії факторів. Зокрема: вміст РПБ та золи призводять до росту міцності при стиску в усі терміни твердіння, а РПБ та полімерного порошку до зростання міцності на згин у віці 28 діб. Визначальним фактором для збільшення адгезійної

здатності є наявність РПП. Досягнення високих міцнісних та інших якісних показників розчинових сумішей та розчинів можливе при відповідній оптимізації складів розчинів.

Для аналізу отриманих рівнянь регресії побудовані двофакторні графічні залежності, які ілюструють вплив факторів складу на властивості розчинових сумішей та розчинів (рис. 6.3...6.12).

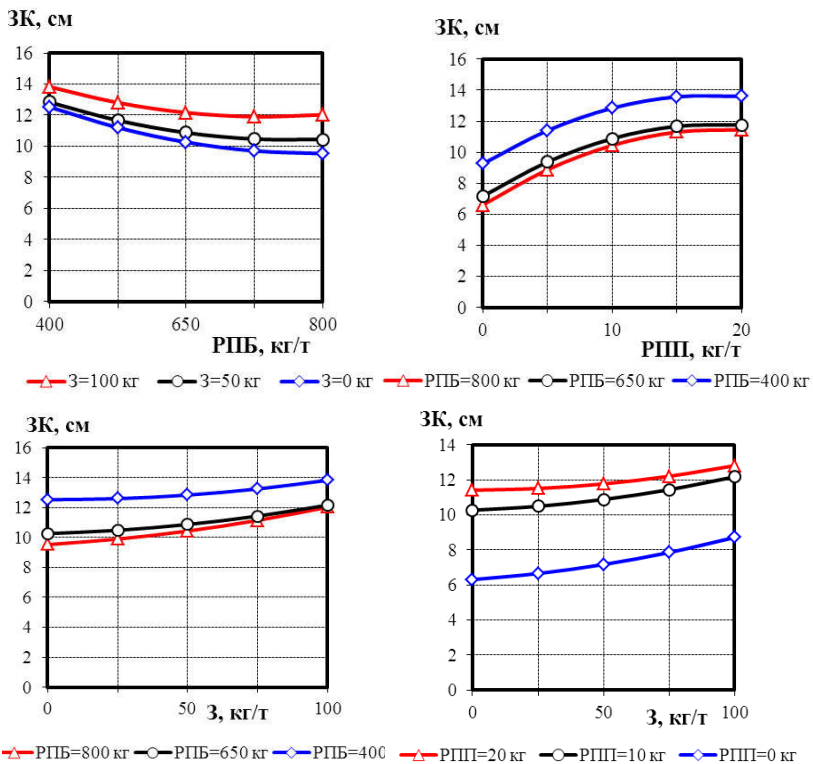


Рис. 6.3. Графічні залежності рухомості ремонтних розчинових сумішей на основі РПБ від факторів складу

Введення РПП до складу розчину призводить до зниження середньої густини, що добре видно на рис. 6.4. Це супроводжується залученням повітря в розчин в присутності водорозчинного полімеру. Густина в порівнянні з еталоном

знизилися для різних дозувань на 7-11%. Крім того, рівномірно розподілене повітря надало пластифікуючого ефекту розчиновим сумішам, що виразилося в збільшенні глибини занурення конуса з 6...9 см до 11...13,5 см при максимальному дозуванні РПП у межах варіювання.

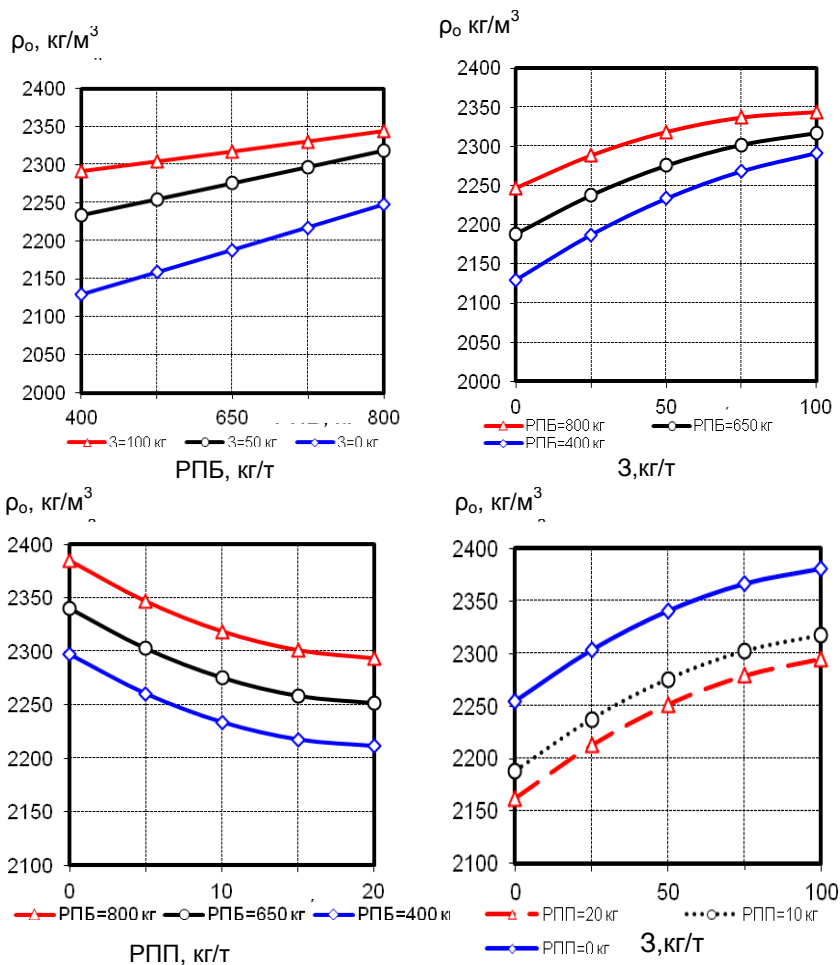


Рис. 6.4. Графічні залежності середньої густини ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

При цьому встановлено, що локалізація повітряних пор якісно не залежить від дозування РПП в межах 0-2%.

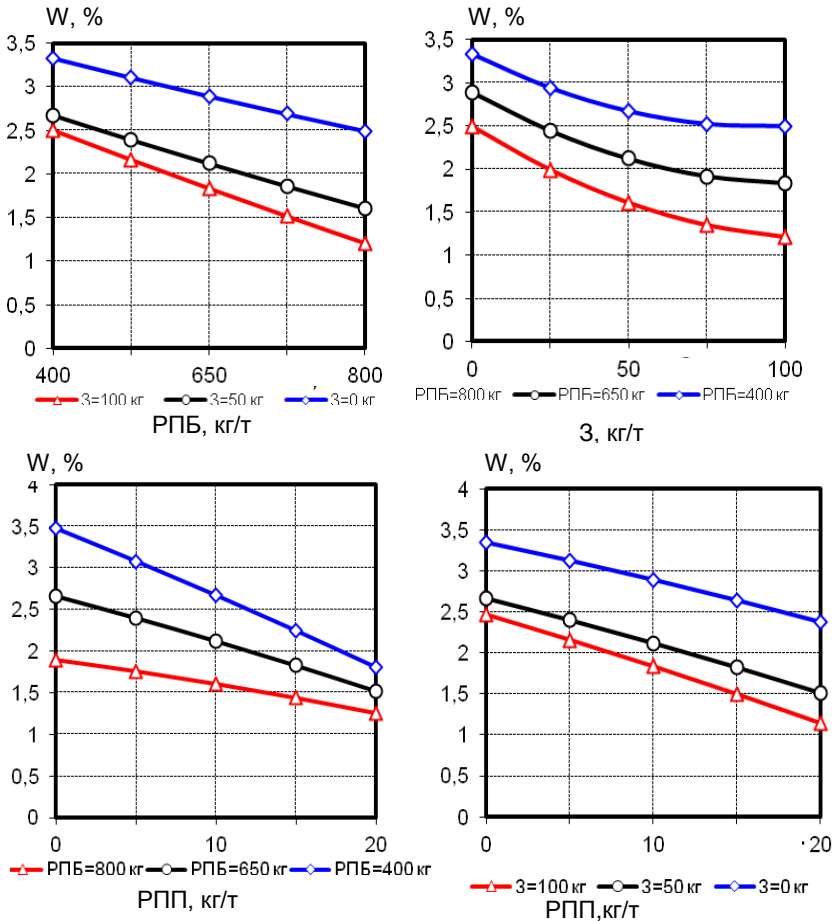


Рис. 6.5. Графічні залежності водопоглинання ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Збільшення дозування РПП Neolith P 4400 до 2% маси суміші супроводжує зменшення водопоглинання на 50..60% при максимальному вмісті РПБ (800 кг) та майже в 2 рази при помірній витраті РПБ (400 кг), (рис. 6.5).

Низький водовміст розчинових сумішей на основі досліджуваних РПБ, підвищена відносна густина цементного каменю, інтенсивна гідратація та тверднення обумовлюють відповідні особливості порової структури розчинів. Аналіз даних, приведених в табл. 6.7 і на рис. 6.5 показує, що, як варто було очікувати, збільшення вмісту РПБ та золи в розчинових сумішей призвело до суттєвого зменшення водопоглинання, як характеристики відкритої капілярної пористості за рахунок зменшення водовмісту.

Важливим наслідком введення РПП Neolith P 4400 в суміші є покращення структури порового простору за рахунок зменшення розміру пор та підвищення однорідності їхнього розподілення. Зменшення товщини водних прошарків на зернах в'язучого обумовлює зменшення середнього радіуса капілярів [196], а однорідності їхнього розподілення сприяє адсорбція на активних центрах твердої фази.

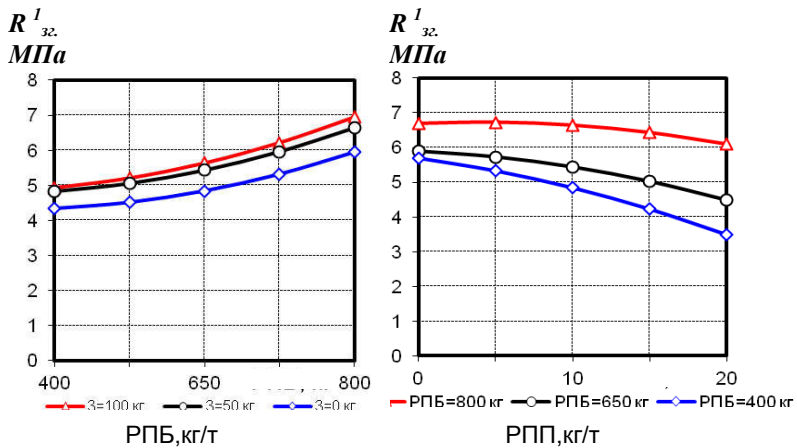


Рис. 6.6. Графічні залежності міцності при згині у віці 1 доби ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

В процесі плівкоутворення в твердіючому розчині утворюються полімерні плівки, що закривають мікропори і полімерні «містки», що з'єднують краї мікротріщин внутрішніх дефектів.

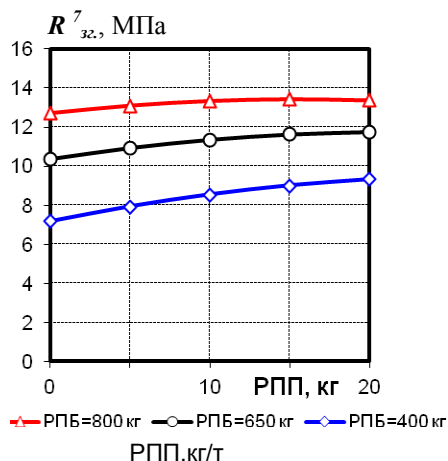
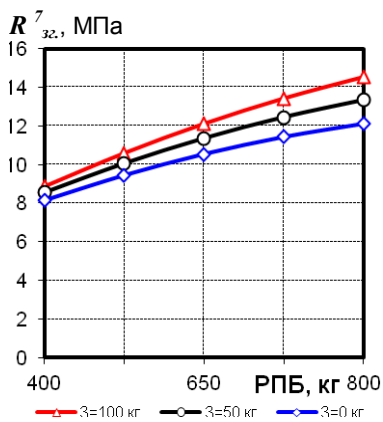


Рис. 6.7. Графічні залежності міцності при згині у віці 7 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

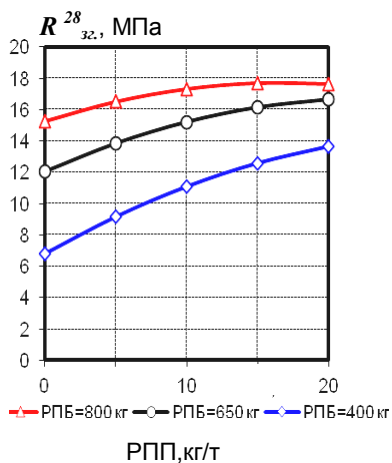
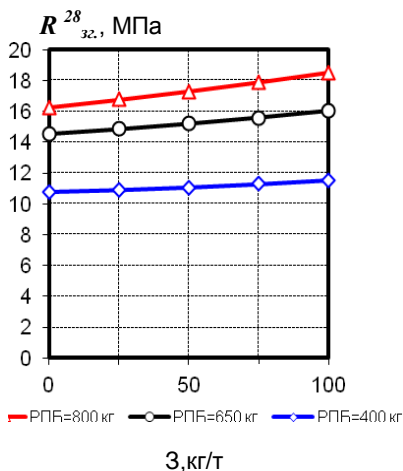


Рис. 6.8. Графічні залежності міцності при згині у віці 28 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Це вказує на те, що існує певний оптимум вмісту РПБ та РПП в розчині, при якому зберігається суцільність цементного гелю в структурі, полімер же заповнює найдрібніші пори і

капіляри, а також обволікає цементні зростки і частинки заповнювача.

Аналізуючи отримані графічні залежності, що зображені на рис. 6.6...6.8 можна зробити висновок, що у межах варіювання факторів на міцність розчинів при згині визначальним є вміст РПБ. Збільшення кількості РПБ з 400 до 800 кг дозволяє підвищувати ранню міцність на 40...50% та марочну на 30...40% при збільшеному вмісті РПБ та золи-виносу, а в сумішах з пониженим вмістом РПБ спостерігається ріст міцності на 8..12%. Зниження вмісту золи у вибраних межах також може знижувати, або практично не впливати на міцність/

Збільшення вмісту РПП в складі суміші може викликати як збільшення так і деяке зниження міцності розчинів. Вплив РПП на 1-добову міцність розчинів спричиняє негативний ефект, що нівелюється при максимальній витраті РПБ та помірній до 1% кількості полімерного порошку (рис. 6.9).

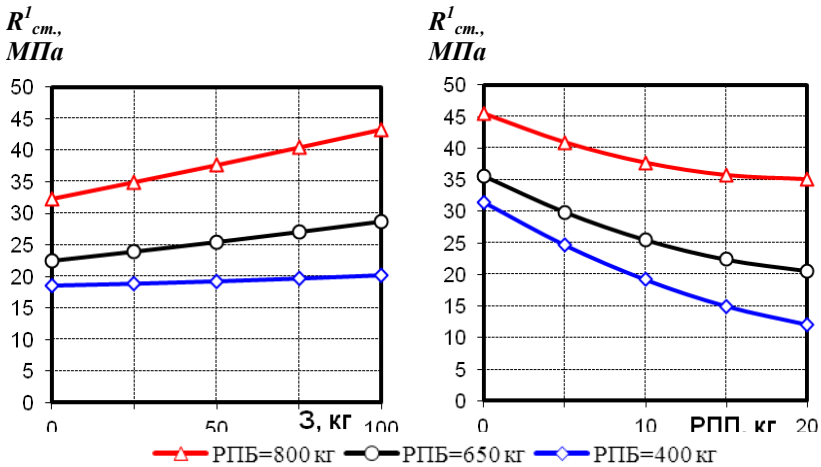


Рис. 6.9. Графічні залежності міцності при стиску у віці 1 доби ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Збільшення міцності розчинів на згин при вмісті РПП 1% відзначається при одночасному збільшенні вмісту золи-виносу та зменшенні РПБ.

Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 6.9) свідчить про те, що у діапазоні варіювання досліджуваних факторів на міцність розчинів при стиску у віці 1 доби, визначальною є витрата РПБ. Збільшення вмісту РПБ з 400 до 800 кг/т дозволяє підвищувати міцність на 50...70% при витраті золи 0...50 кг. Збільшення понад 50 кг/т супроводжує подальший ріст міцності у віці 1 доби у 2...2.2 рази. Вплив введення золи-виносу має менш значний ефект, збільшення її вмісту до 50 кг/т дозволяє підвищувати міцність розчинів на 10...15% при помірних витратах РПБ (400...500 кг/т) та 25...30% при максимальному вмісті в межах варіювання. Це пояснюється формуванням щільної структури за рахунок початкової міцності контактів, рівномірного розподілу часток зерен в'яжучого і заповнювача та активації кристалізаційних процесів. Вплив добавки має менш значний ефект, при чому введення РПП Neolith P 4400 у кількості 10% призводить до зниження ранньої міцності на 25...30% при максимальній частці РПБ та на 70...100% за умови збільшення вмісту РПП до 20%. Це пояснюється надлишковою кількістю залученого повітря до складу суміші, а також сповільненням процесів гідратації цементного каменю у присутності полімерів.

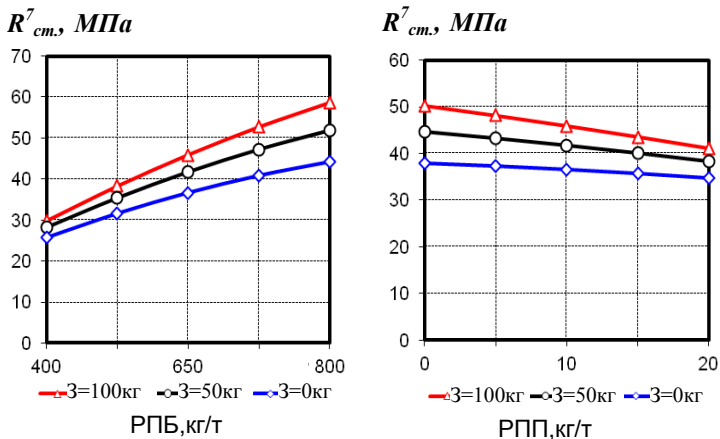


Рис. 6.10. Графічні залежності міцності при стиску у віці 7 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Проаналізувавши отримані графічні залежності (рис.6.10, 6.11) маємо, що у досліджуваному діапазоні зміни факторів складу сухих сумішей, можливе отримання розчинів з 28-добовою міцністю при стиску 36,6...82,6 МПа. В 7-добовому віці міцність розчинів сягає 65...82% марочної 28-добової міцності. Міцність закономірно знижується при зміні складів сумішей, що призводить до збільшення водоцементного відношення. В цьому плані особливо суттєво відчувається вплив витрати РПБ та золи.

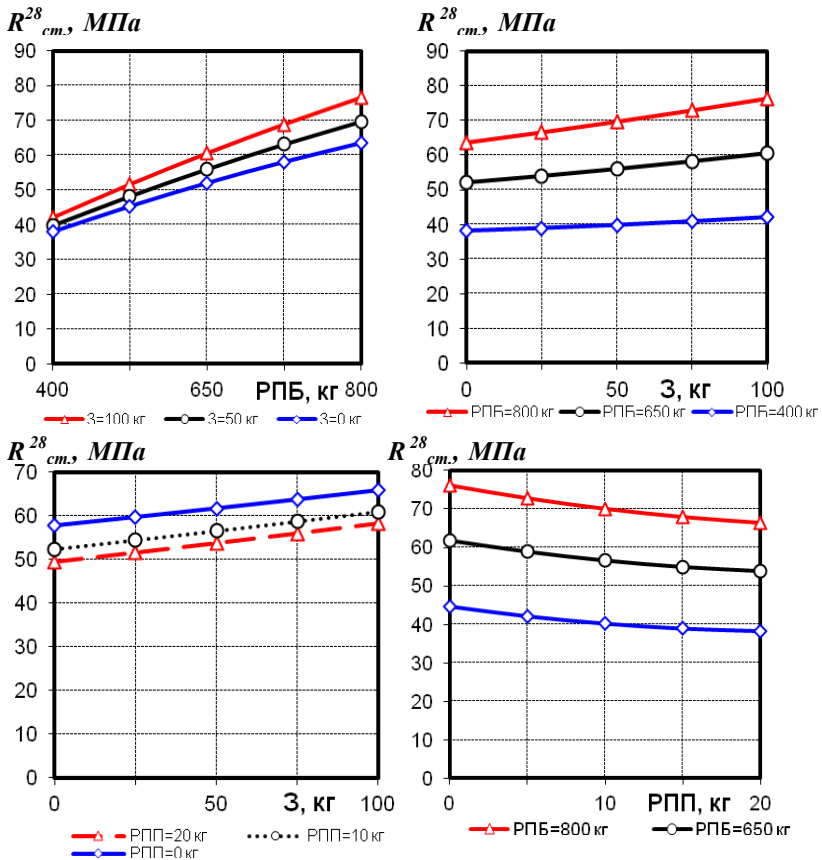


Рис. 6.11. Графічні залежності міцності при стиску у віці 28 днів ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

На графіках як 7-и так і 28-добової міцності найбільш значні лінійні ефекти проявляються для факторів X_1 і X_4 , тобто витрат РПБ і золи-виносу.

Збільшення вмісту дисперсних компонентів (РПБ, зола-виносу) суміші може викликати збільшення 28-добової міцності розчинів. Ріст міцності розчинів при збільшенні вмісту порошкового бетону більш вагомий при підвищеному вмісті золи. При недостатньому вмісті РПБ в розчинових сумішах зростання міцності практично не спостерігається. Зниження міцності притаманне при максимальному дозуванні у розчиновій суміші РПП, що пояснюється значною кількістю залученого повітря в складі досліджуваної суміші. Додавка Neolith P 4400 при максимальній частці РПБ призводить до зниження марочної міцності на 12...17% у порівнянні зі складом без полімеру та на 8...12% при мінімальній витраті РПБ.

Позитивний вплив золи та РПБ на міцність розчинів може бути суттєво зменшений чи зведений до нуля при неоптимальній витраті полімерного порошку.

Досягнення певних значень міцнісних показників розчинів можливе при різних співвідношеннях факторів, які характеризують вміст основних компонентів. При цьому спільне введення дисперсних компонентів позитивно позначається на міцності розчину навіть при незмінному водовмісті, що можна пояснити створенням кращих умов для ущільнення та взаємодії між частинками у твердіючому розчині.

Аналіз отриманих даних, рис. 6.12, свідчить, що застосування в ремонтних розчинах як основного компоненту РПБ дає можливість забезпечити в досліджуваному діапазоні достатньо високі значення адгезійної міцності (до 2,5 МПа). Визначальним фактором є вміст РПП, введення якого в кількості до 2% за інших рівних умов дозволяє підвищити адгезійну міцність розчину в 3...4 рази або на 0,9...1,6 МПа.

Підвищення кількості золи-виносу у складі ремонтних розчинів до 50 кг супроводжує збільшення міцності зчеплення з основою на 8...12% ,а при подальшому збільшенні вмісту золи до 100 кг/т – 25...30% за умови зменшення частки РПБ на 15...20%. Такий вплив згаданих технологічних факторів на

адгезію можна пояснити впливом не тільки пористості контактної шару, але й ступеня змочування розчином основи.

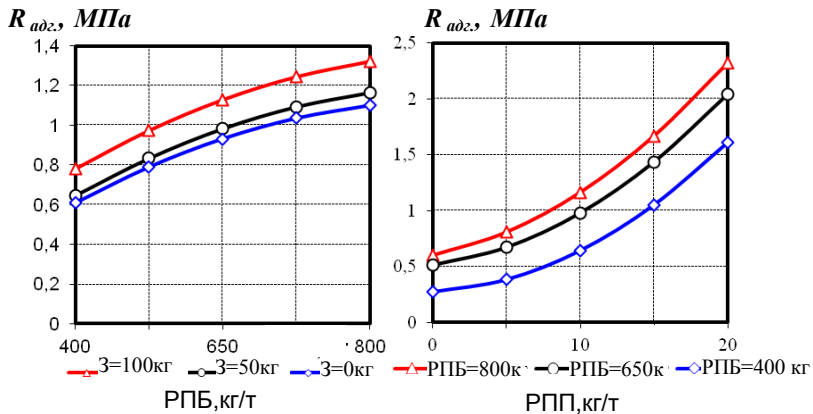


Рис. 6. 12. Графічні залежності адгезійної міцності ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Суперпластифікатор Melflux у складі реакційно-порошкового бетону позитивно впливає на адгезію розчинів як в результаті зміни їх поверхневої енергії, так і в результаті зміни якісних характеристик контактної шару, насамперед в результаті збільшення його змочуваності і зменшення вмісту надлишкової вологи.

6.4. Гідроізоляційні суміші

Надійність експлуатації будівельних об'єктів багато в чому залежить від їх гідроізоляції.

Просочування води відбувається через пори. Пористість є невід'ємною складовою цементної матриці. Так, при В/Ц=0,5 об'єм пор розмірами від 1 нм до 1мм становить 46% об'єму цементного каменю. Чим вище В/Ц, тим в більшій кількості утворюються пори [29, 119, 199].

Важливим є вибір цементів, які повинні містити мінімум компонентів, які при гідратації і його твердінні перетворюються в

водорозчинні сполуки. Вирішальну роль для досягнення високих фізико-механічних характеристик відіграють інертні наповнювачі. Важливий не тільки мінералогічний і фракційний склад, а й конфігурація частинок наповнювачів, а також відсутність в них капілярних пор.

Заповнювачі і наповнювачі не повинні містити водорозчинних компонентів [200, 201]. Їх наявність підвищує гідрофільність розчину, веде до росту В/Ц. При виборі наповнювачів рекомендується перевіряти їх водопоглинання і розчинність в нейтральному і лужному середовищі. Інертні наповнювачі не повинні містити компонентів, що змінюються в об'ємі при контакті з водою. Винятком є кольматаційні гідроізоляційні суміші. Ситові характеристики інертних наповнювачів повинні забезпечувати максимально щільну упаковку.

Для вивчення впливу факторів складу гідроізоляційних сумішей на основі РПБ на їх властивості були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до тривірневого двохфакторного плану B_2 [198]. Умови планування експериментів наведені в табл. 6.9.

Таблиця 6.9

Умови планування експериментів

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодований	-1	0	+1	
Частка РПБ, % за масою	X_1	25	37,5	50	12,5
Вміст Neolith P 4400, % мас	X_2	1	1,5	2	0,5

Як вихідні параметри використані водопоглинання, водонепроникність, міцність при стиску та згині розчинів.

Матриця планування та склад гідроізоляційних сумішей, а також експериментальні результати наведено в табл. 6.10...6.12 відповідно.

Таблиця 6.10

Матриця планування та склад гідроізоляційних сумішей

№ п/п	Кодовані значення		Натуральні значення		Витрати матеріалів на 1т суміші			Вода замішу- вання, л
	X ₁	X ₂	РПБ, %	РПП, %	РПБ, кг	РПП, кг	Пісок, кг	
1	1	1	50	2	500	20	480	140
2	1	-1	50	1	500	10	490	155
3	-1	1	25	2	250	20	730	150
4	-1	-1	25	1	250	10	740	175
5	1	0	50	1,5	500	15	485	150
6	-1	0	25	1,5	250	15	735	155
7	0	1	37,5	2	375	20	605	125
8	0	-1	37,5	1	375	10	615	140
9	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135
10	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135
11	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135

Після статистичної обробки результатів експериментів (табл.6.11), виконаних згідно плану були отримані коефіцієнти рівнянь регресії (табл. 6.12), які можна розглядати як характеристики впливу на якісні показники властивостей розчинів досліджуваних факторів в певному діапазоні їх варіювання.

Таблиця 6.11

Експериментальні результати дослідження
гідроізоляційних сумішей

Точка плану	Водопог- ливання у віці 28 діб,%	Міцність, МПа						Водонепро- никність, у віці 28 діб, МПа
		на згин, у віці			на стиск, у віці			
		1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб	
1	1,4	2,1	4,3	6,50	4,0	8,0	18,0	1,0
2	2,7	3,1	3,4	5,94	7,0	15,0	24,0	0,8
3	3,2	1,2	2,7	3,67	2,0	4,2	7,5	0,6
4	4,1	1,9	2,1	2,24	3,0	7,5	10,0	0,4
5	2,0	2,4	3,6	5,98	6,0	12,0	22,0	0,8
6	3,5	1,5	1,9	3,02	2,6	4,5	9,0	0,4

Продовження табл. 6.11

Точка плану	Водопоглинання у віці 28 діб,%	Міцність, МПа						Водонепроникність, у віці 28 діб, МПа
		на згин, у віці			на стиск, у віці			
		1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб	
7	2,6	1,8	3,9	4,89	3,3	6,0	14,0	0,8
8	3,9	2,6	2,9	4,21	5,3	10,0	17,0	0,4
9	3,2	2,1	3,2	4,62	4,3	8,5	15	0,6
10	3,3	2,1	3,3	4,60	4,0	8,0	16	0,6
11	3,3	2,0	3,2	4,50	4,0	8,0	16	0,6

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати математичні моделі водопоглинання, міцності при стиску та згині у віці 1, 7 та 28 діб, а також водонепроникності досліджуваних розчинів, наведені в табл. 6.12.

Таблиця 6.12

Математичні моделі водопоглинання, міцності при стиску та згині, водонепроникності

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Водопоглинання,%	$W_0 = 3,24 - 0,78 \cdot x_1 - 0,58 \cdot x_2 - 0,1 \cdot x_1 x_2 - 0,46 \cdot x_1^2 + 0,04 \cdot x_2^2$
Міцність на згин у віці 1 діб, МПа	$R_{зг}^1 = 2,06 + 0,5 \cdot x_1 - 0,42 \cdot x_2 - 0,08 \cdot x_1 x_2 + 0,2 \cdot x_1^2 + 0,14 \cdot x_2^2$
Міцність на згин у віці 7 діб, МПа	$R_{зг}^7 = 3,19 + 0,77 \cdot x_1 + 0,42 \cdot x_2 + 0,08 \cdot x_1 x_2 - 0,38 \cdot x_1^2 + 0,27 \cdot x_2^2$
Міцність на згину віці 28 діб, МПа	$R_{зг}^{28} = 4,55 + 1,58 \cdot x_1 + 0,44 \cdot x_2 - 0,22 \cdot x_1 x_2 - 0,02 \cdot x_1^2 + 0,03 \cdot x_2^2$
Міцність на стиск у віці 1 діб, МПа	$R_{ст}^1 = 4,19 + 1,57 \cdot x_1 - 1,0 \cdot x_2 - 0,5 \cdot x_1 x_2 - 0,06 \cdot x_1^2 - 0,06 \cdot x_2^2$
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	$R_{ст}^7 = 8,05 + 3,13 \cdot x_1 - 2,38 \cdot x_2 - 0,93 \cdot x_1 x_2 + 0,39 \cdot x_1^2 + 0,14 \cdot x_2^2$
Міцність на стиску віці 28 діб, МПа	$R_{ст}^{28} = 15,77 + 0,2 \cdot x_1 + 0,13 \cdot x_2 - 0,88 \cdot x_1 x_2 - 0,42 \cdot x_1^2 - 0,42 \cdot x_2^2$
Водонепроникність	$W = 0,58 + 1,57 \cdot x_1 - 1,0 \cdot x_2 + 0,05 \cdot x_1^2 + 0,05 \cdot x_2^2$

Аналіз коефіцієнтів рівнянь регресії (табл. 6.12) показників властивостей гідроізоляційних розчинів дозволяє оцінити фактори за величиною ефекту їхнього впливу. На

досліджувані властивості більш суттєвий вплив чинить вміст РПБ у порівнянні з добавкою полімерного порошку Neolith 4400 при збільшенні їх витраті в діапазоні варіювання. Згідно отриманих даних спостерігається суттєвий вплив ефектів взаємодії факторів. Очевидно, що досягнення високих фізико-механічних показників розчинів можливе при відповідній оптимізації вмісту РПБ та РПП у їх складі.

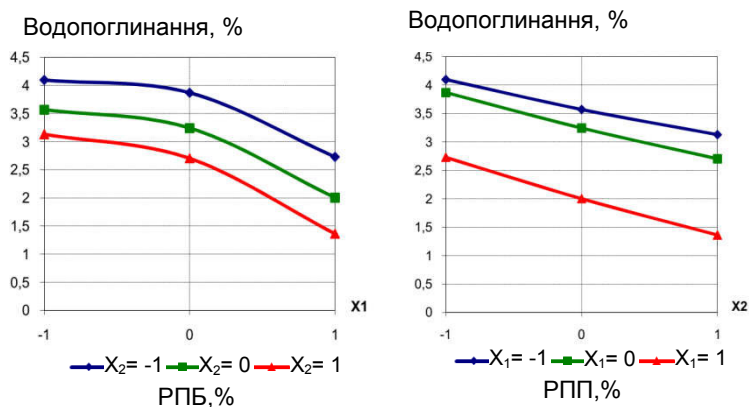


Рис. 6.14. Графічні залежності водопоглинання гідроізоляційних розчинів на основі РПБ від факторів складу де X_1 – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%, X_2 – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

Водопоглинання розчину помітно зменшується зі збільшенням вмісту РПБ у порівнянні з РПП (рис. 6.14). Вміст порошкової бетонної суміші в межах 650...800 кг/т є достатнім для забезпечення достатнього низького водопоглинання при мінімальній та максимальній витраті полімерного порошку, яке становить 1,4...3,9% відповідно (рис. 6.14).

З отриманих даних чітко видно негативний вплив на міцність розчинів, як при стиску так і при згині у віці 1 доби, збільшення вмісту добавки РПП (рис. 6.15...6.19). Разом з тим, варто відмітити, що при підвищенні вмісту полімеру спостерігається позитивний вплив на міцність при згині у віці 28 діб. Ефект взаємодії факторів є негативним, хоча вклад його на величину міцності не дуже значний.

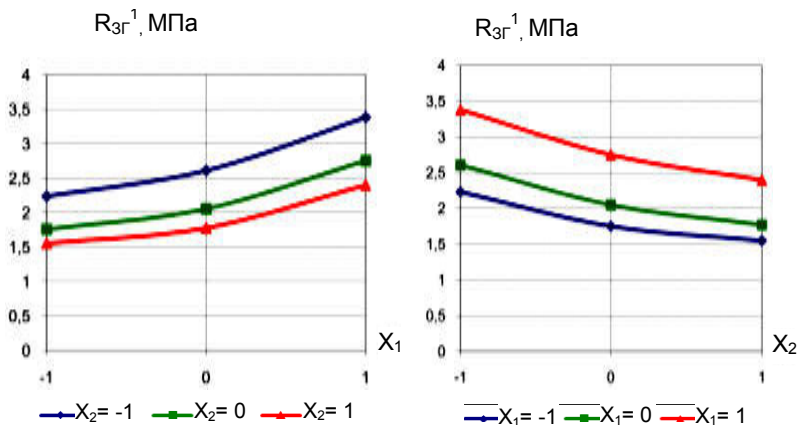


Рис.6.15. Графічні залежності міцності при згині у віці 1 доби гідроізоляційних розчинів РПБ від факторів складу де X_1 – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%, X_2 – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

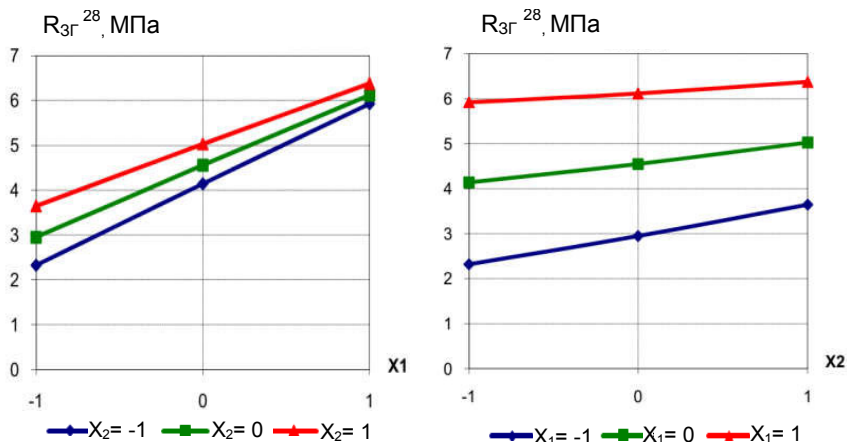


Рис. 6.16. Графічні залежності міцності при згині у віці 28 діб гідроізоляційних розчинів РПБ, де X_1 – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%, X_2 – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

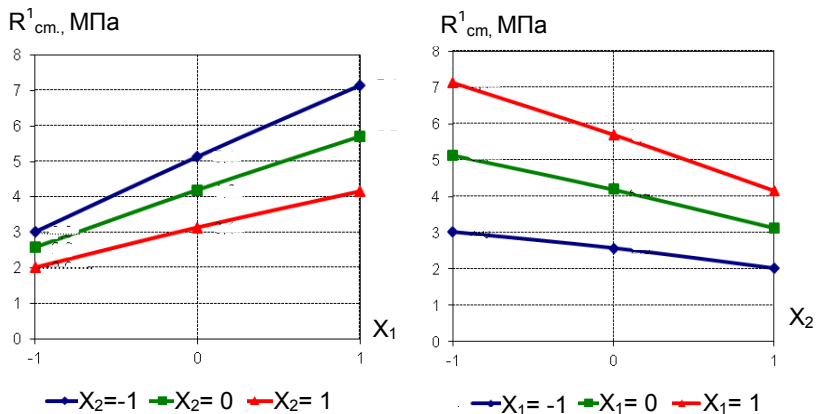


Рис. 6.17. Графічні залежності міцності при стиску у віці 1 діб гідроізоляційних розчинів РПБ, де X_1 – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%, X_2 – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

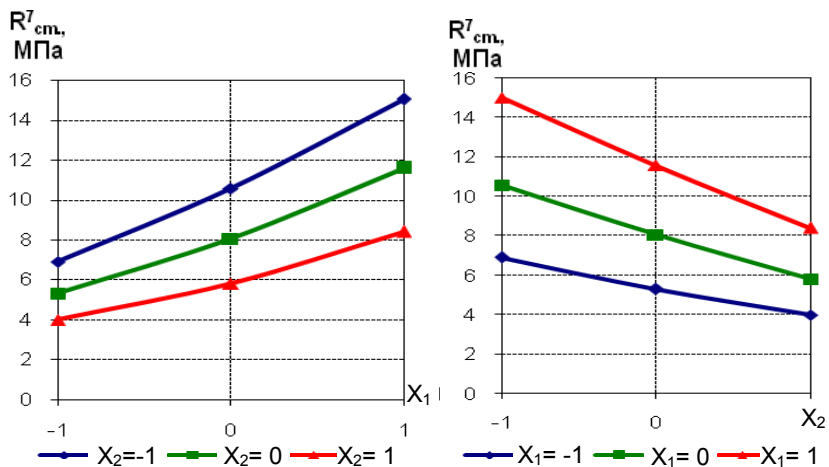


Рис. 6.18. Графічні залежності міцності при стиску у віці 7 діб гідроізоляційних розчинів РПБ, де X_1 – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%, X_2 – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

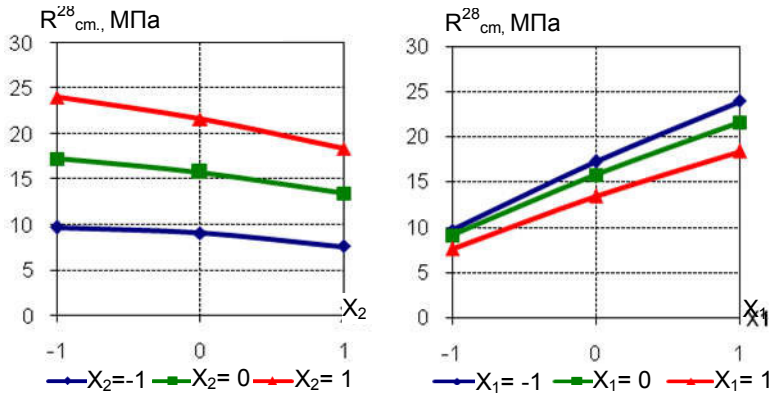


Рис. 6.19. Графічні залежності міцності при стиску у віці 28 діб гідроізоляційних розчинів РПБ, де X_1 – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%, X_2 – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

Вплив досліджуваних факторів на показник міцності є у певній мірі лінійним, про що свідчать незначимі квадратичні коефіцієнти рівнянь регресії. Особливо характерно це проявляється для міцності на згин у віці 28, діб на стиск в усі терміни твердіння. Збільшення кількості РПБ від 400 до 800 кг/т призводить до збільшення 1-о добової міцності на стиск в 1.8...2 рази, а 28-и добової в 2,4 рази. Для міцності при згині, приріст міцності, що зумовлений збільшенням витрати РПБ, більш низький – 50...60% та 70...80% – відповідно при вмісті РПП 1% та 2%.

Як впливає з характеру взаємодії підвищений вміст полімерної добавки більш позитивно впливає на міцність розчину на згин при меншій витраті РПБ.

Водонепроникність. Водонепроникність розчинів у вирішальній мірі залежить від особливостей їх пористої структури. Якщо на міцність бетону основний вплив має загальна пористість, то водонепроникність є функцією відкритої наскрізний пористості. Рядом дослідників [29, 202] зазначено, що основними шляхами проникнення води в розчин є пори седиментаційного походження, утворення яких найбільш характерно для бетонів і розчинів з підвищеною рухомістю.

Седиментація залежить головним чином від в'язкості цементного тіста, а основною седиментаційною характеристикою розчинової суміші є її водовідділення.

Зола-виносу робить істотний вплив на в'язкість пластифікованого цементного тіста і водовідділення бетонної суміші. За рахунок золи-виносу, що вводиться до складу РПБ зменшується кількість мікропор і має місце кольматація відкритих пор.

Основним чинником, що визначає величину водонепроникності – водоцементне відношення. Різке збільшення водонепроникності при В/Ц менше 0,25...0,4 може бути пояснено як зменшенням загальної пористості, так і перерозподілом співвідношення між різними типами пор.

Водонепроникність гідроізоляційних розчинових сумішей на основі РПБ у віці 28 діб за рахунок вибору оптимальних значень факторів та їх поєднань може досягати значення $W=0,6...1,0$ МПа.

Із збільшенням тривалості твердіння водонепроникність підвищується в результаті незворотної зміни структури порового простору і збільшення об'єму твердої фази в цементному камені .

За даними В.В. Стольнікова [202, 203] при достатньому вологісному режиму твердіння підвищення водонепроникності розчинів в пізні терміни значно більше, ніж відносний приріст міцності на стиск. При цьому найбільше збільшення водонепроникності відзначено за інших рівних умов для бетонів і розчинів з вищими значеннями В/Ц і меншу з низькими значеннями В/Ц, рис.6.20 . З метою визначення впливу РПБ на проникність був визначений характер пористості зразків на основі золівмісних РПБ з різним вмістом РПП в їх складі. Було доведено, що введення РПП у кількості 1% незначно зменшує кількість відкритих капілярних пор. Із збільшенням вмісту Neolith P 4400 до 2% загальна кількість капілярних пор суттєво зменшується. Однак підвищений вміст РПБ (800 кг/т) призводить до значного зменшення еквівалентного радіуса пор, що зумовлює зниження проникності затверділого розчину.

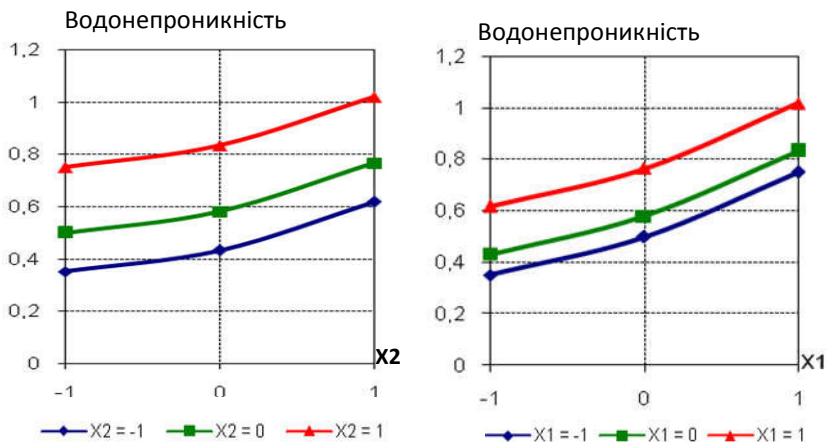


Рис. 6.20. Графічні залежності водонепроникності гідроізоляційних розчинів РПБ, де X_1 – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%, X_2 – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

Особливості порової структури розчинів та низьке водопоглинання є визначальними для їх водонепроникності. В процесі твердіння розчинів утворюються полімерні плівки, що закривають мікропори і полімерні «містки», що з'єднують краї мікротріщин внутрішніх дефектів.

Гідроізоляційні суміші на основі РПБ характеризуються високими марками за водонепроникністю W6-W10, що дозволяє їх використовувати в різних конструкціях.

6.5. Поризовані та теплоізоляційні суміші

У сучасних економічних умовах все більшої актуальності набуває проблема енергозбереження. Вирішення цієї проблеми досягається застосуванням ефективних поризованих та теплоізоляційних матеріалів.

Легкі поризовані розчини. Для зменшення теплопровідності розчинів до їх складу вводять легкі заповнювачі (спучений перлітовий, вермикулітовий та інші піски), або застосовують добавки-поризатори. Однак міцність таких розчинів часто буває недостатньою (марки не вище

M50...M75), до того ж для її забезпечення необхідна підвищена (до 500 кг/м³) витрата портландцементу.

Для досягнення достатньої міцності при необхідній рухомості розчинової суміші, як показали наші дослідження, можна використовувати в якості основного компоненту реакційно-порошкові бетонні. Такі суміші доцільно виготовляти у вигляді готових до використання сухих будівельних сумішей (СБС), або змішуванням РПБ з необхідною кількістю легкого заповнювача та піску, як в заводських умовах, так і безпосередньо на будівельному майданчику.

Для підвищення термічного опору конструкцій при зведенні будівель та споруд доцільно використовувати поризовані розчини. Поризовані розчини на основі сухих сумішей при відповідності їх властивостей необхідним вимогам можуть успішно використовуватись для влаштування «теплих підлог», у якості штукатурних, а також як мурувальні розчини при застосуванні стінових матеріалів з підвищеними теплоізоляційними властивостями (поризовані керамічні блоки, піно-, газобетонні блоки і т.п.). Ефект від застосування таких матеріалів зростає, якщо теплопровідність розчину для кладки не поступається аналогічному показнику стінового матеріалу. Як відомо, традиційні цементно-піщані мурувальні розчини мають високу теплопровідність (0,8-0,9 Вт/м·К), що особливо негативно відображається в кладці з поризованих блоків (0,16 Вт/м·К), які вони скріплюють, в результаті чого в такій конструкції в місцях шва утворюються «містки холоду». При застосуванні таких розчинів збільшення товщини швів до 10 мм призводить до зниження середнього термічного опору конструкції приблизно на 20%.

Зазвичай традиційна технологія передбачає нанесення мурувальних розчинів шаром 10...20 мм. Сучасні технології дозволяють виготовляти стінові камені та блоки з мінімальними (до 1 мм) відхиленнями геометричних розмірів від стандартних, що дає можливість використовувати тонкошарову кладку з товщиною шва 1...5 мм і призводить до суттєвої економії розчину. Розчини для тонкошарової кладки повинні мати теплопровідність, яка наближається до теплопровідності

пористих стінових матеріалів. Поряд зі зменшенням теплових витрат такі розчини повинні забезпечувати високу адгезію до основи, водо- та морозостійкість.

З метою вивчення впливу факторів складу на міцнісні характеристики полегшених розчинів на основі РПБ, а також встановлення оптимальних параметрів їх виготовлення основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експериментів. Для цього був реалізований тривірневий трьохфакторний план B_3 [198], умови планування експериментів якого наведені в табл. 3.13.

Як добавка-поризатор розчинів був застосований піноутворювач UFAPORE CC85 виробництва фірми Bang & Bonsomer концерну Mapei. Даний поризатор є сумішшю аніоноактивних ПАР. Рекомендоване дозування добавки при введенні в мурувальні розчини – 0,02...0,05% маси в'язучого. Окрім пластифікації та підвищення морозостійкості розчину добавка поризатору дещо знижує водовідділення і седиментаційне розшарування розчинових сумішей [3].

Таблиця 6.13

Умови планування експериментів при дослідженні поризованих розчинів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Відношення цементу до заповнювача, (РПБ/Зап.)	X_1	1:3	1:2	1:1	1
Вміст добавки Ufapore у розчині, %	X_2	0,04	0,075	0,11	0,035
Вміст Na_2SO_4 , у розчині, % від РПБ	X_3	0	1	2	1

Для підвищення ефективності введення суперпластифікаторів, а також при виконанні робіт у холодну пору року, при температурах нижче $5^\circ C$ доцільне введення прискорювача тверднення Na_2SO_4 .

У ході досліджень виготовляли розчини на основі РПБ, у яких в якості заповнювача використовували золу-виносу та

кварцовий пісок. Рухомість розчинів становила 180 мм за розпливом на віскозиметрі Суттарда. Для розчинової суміші визначали водов'язуче відношення, яке забезпечує необхідну рухомість, для отриманих розчинів – середню густину та міцність на стиск зразків-кубів з ребром 70,7 мм, які тверднули у повітряно-сухих умовах у віці 3 та 28 діб згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Основні експериментальні результати досліджень мурувальних поризованих розчинів на основі РПБ наведені в табл. 6.14 та на рис. 6.20...6.23.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведені в табл. 6.15, показники рухомості (табл. 6.16) та відповідні графічні залежності середньої густини та міцності у віці 3 та 28 діб на рис.6.21...6.23.

Таблиця 6.14

Експериментальні результати досліджень поризованих розчинів

№	Фактори			В/Ц		ρ_0 , кг/м ³		Міцність у віці, МПа, діб				Теплопровідність λ , Вт/(м·К)		Коефіцієнт конструктивної якості ККЯ*	
	РПБ Зап	Ufapore, %	Na ₂ SO ₄ , %	Заповнювачі											
				Зола		Пісок		Зола		Пісок		Зола	Пісок	Зола	Пісок
				3	28	3	28	3	28						
1	1:1	0,11	2	0,4	0,34	1180	1320	8,9	15,4	10,2	17,7	0,32	0,36	0,013	0,013
2	1:1	0,11	0	0,38	0,32	1170	1310	8,1	14,0	9,2	16,0	0,32	0,36	0,012	0,012
3	1:1	0,04	2	0,51	0,43	1340	1490	12,7	21,9	14,7	25,4	0,36	0,41	0,016	0,017
4	1:1	0,04	0	0,5	0,43	1320	1470	11,7	20,1	13,6	23,3	0,36	0,40	0,015	0,016
5	1:3	0,11	2	0,55	0,47	1360	1550	6,1	10,5	7,0	12,1	0,37	0,42	0,008	0,008
6	1:3	0,11	0	0,53	0,45	1350	1540	5,7	9,8	6,5	11,2	0,37	0,42	0,007	0,007
7	1:3	0,04	2	0,66	0,56	1400	1590	7,8	13,4	9,0	15,5	0,38	0,43	0,010	0,010
8	1:3	0,04	0	0,64	0,54	1390	1580	7,0	12,0	7,9	13,6	0,38	0,43	0,009	0,009
9	1:1	0,075	1	0,45	0,38	1210	1370	10,0	17,2	11,4	19,6	0,33	0,37	0,014	0,014
10	1:3	0,04	1	0,65	0,55	1390	1580	7,4	12,7	8,6	14,7	0,38	0,43	0,009	0,009
11	1:2	0,11	1	0,45	0,38	1200	1380	8,4	14,5	9,5	16,4	0,33	0,38	0,012	0,012
12	1:2	0,04	1	0,53	0,45	1290	1470	11,7	20,2	13,6	23,4	0,35	0,40	0,016	0,016
13	1:2	0,075	2	0,5	0,43	1250	1440	10,9	18,8	12,3	21,2	0,34	0,39	0,015	0,015
14	1:2	0,075	0	0,48	0,41	1240	1430	9,9	17,1	11,4	19,7	0,34	0,39	0,014	0,014
15	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1250	1450	10,3	17,8	11,7	20,3	0,34	0,39	0,014	0,014
16	1:2	0,075	1	0,5	0,43	1250	1440	10,3	17,7	11,6	20,0	0,34	0,39	0,014	0,014
17	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1240	1440	10,2	17,5	11,7	20,1	0,34	0,39	0,014	0,014

* – відношення міцності розчину при стиску у віці 28 діб до його середньої густини

Таблиця 6.15

Експериментально-статистичні моделі властивостей
поризованих розчинів на основі РПБ

Заповнювач	Експериментально-статистичні моделі
Середня густина, кг/м ³	
зола	$\rho_{0(z)} = 1246 - 67 \cdot x_1 - 48 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 - 28,8 \cdot x_1 x_2 + 1,3 \cdot x_1 x_3 - 1,3 \cdot x_2 x_3 + 59 \cdot x_1^2 + 4 \cdot x_2^2 + 4 \cdot x_3^2$
пісок	$\rho_{0(n)} = 1440 - 88 \cdot x_1 - 50 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 - 31,3 \cdot x_1 x_2 + 1,3 \cdot x_1 x_3 - 1,3 \cdot x_2 x_3 + 43,5 \cdot x_1^2 - 6,5 \cdot x_2^2 + 3,5 \cdot x_3^2$
Міцність на стиск у віці 3 діб, МПа	
зола	$R_{cm}^3 = 10,3 + 1,75 \cdot x_1 - 1,36 \cdot x_2 + 0,41 \cdot x_3 - 0,54 \cdot x_1 x_2 + 0,08 \cdot x_1 x_3 - 0,08 \cdot x_2 x_3 - 1,64 \cdot x_1^2 - 0,25 \cdot x_2^2 + 0,09 \cdot x_3^2$
пісок	$R_{cm}^3 = 11,76 + 2,01 \cdot x_1 - 1,64 \cdot x_2 + 0,46 \cdot x_3 - 0,69 \cdot x_1 x_2 + 0,06 \cdot x_1 x_3 - 0,09 \cdot x_2 x_3 - 1,79 \cdot x_1^2 - 0,24 \cdot x_2^2 + 0,06 \cdot x_3^2$
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	
зола	$R_{cm}^{28} = 17,77 + 3,02 \cdot x_1 - 2,34 \cdot x_2 + 0,7 \cdot x_3 - 0,94 \cdot x_1 x_2 + 0,14 \cdot x_1 x_3 - 0,14 \cdot x_2 x_3 - 2,83 \cdot x_1^2 - 0,43 \cdot x_2^2 + 0,16 \cdot x_3^2$
пісок	$R_{cm}^{28} = 20,26 + 3,49 \cdot x_1 - 2,78 \cdot x_2 + 0,81 \cdot x_3 - 1,15 \cdot x_1 x_2 + 0,13 \cdot x_1 x_3 - 0,18 \cdot x_2 x_3 - 3,15 \cdot x_1^2 - 0,4 \cdot x_2^2 + 0,15 \cdot x_3^2$

Таблиця 6.16

Рухомість поризованих розчинів
поризованих розчинів на основі РПБ

Точка	Витрата поризатора, %	Розплив конуса(РК), мм	
		Зола-виносу	Кварцовий пісок
1	0,04	185	181
2	0,075	210	200
3	0,11	216	205

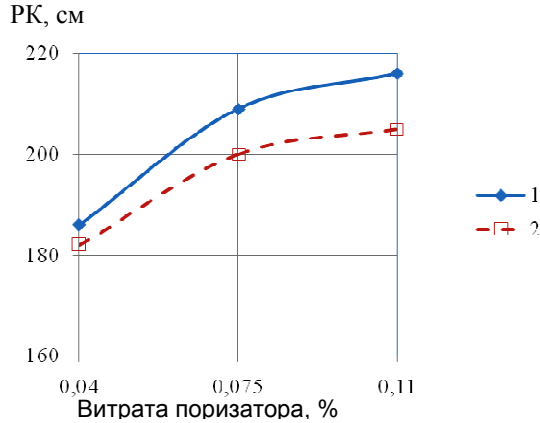


Рис. 6.20. Залежність розпливу конуса(ПК) поризованих розчинів від витрати поризатора та виду заповнювача, (1 – заповнювач–зола-виносу; 2 – заповнювач – кварцовий пісок)

Аналізуючи отримані дані, можна відмітити, що поризація розчинів помітно збільшує їх рухомість згідно рис. 6.20. Водопотреба розчинових сумішей для досягнення необхідної легкоукладальності суттєво зменшується при збільшенні кількості добавки-пороутворювача, але до певної межі, яка залежить від середньої густини отриманої розчинової суміші та співвідношення "в'язуче:заповнювач". При однаковому вмісті пороутворювача зменшення співвідношення "РПБ:Заповнювач" від 1:1 до 1:2 незначно зменшує водопотребу розчинової суміші, у якій заповнювачем є зола-виносу. При цьому водов'язуче відношення дещо збільшується. Подальше зменшення співвідношення "РПБ:Заповнювач" до 1:3 помітно зменшує водопотребу та водоцементне відношення. Заміна золи як заповнювача на кварцовий пісок суттєво зменшує водопотребу та збільшує рухомість розчинової суміші. Зниження водопотреби при цьому пропорційне збільшенню кількості добавки-пороутворювача та вмісту заповнювача в суміші за інших рівних умов.

Згідно отриманих математичних моделей (табл. 6.15) та графічних залежностей (рис. 6.21) можна зробити висновок, що основними факторами, що впливають на середню густину, є вміст та доля заповнювача, а також вміст добавки поризатора у

розчині. Прискорювач твердіння введений до складу суміші, практично не впливає на густину.

Збільшення вмісту пороутворювача зменшує густину розчину, втім після певної межі (приблизно 0,1% від маси сухої суміші) ефект стає нестабільним. Подальше зменшення густини при використанні прийнятого поризатора практично незначне. З цією метою можна використовувати добавки з більш інтенсивним піноутворенням, хоча при цьому можна очікувати негативного їх впливу на кінетику твердіння та міцність розчинів.

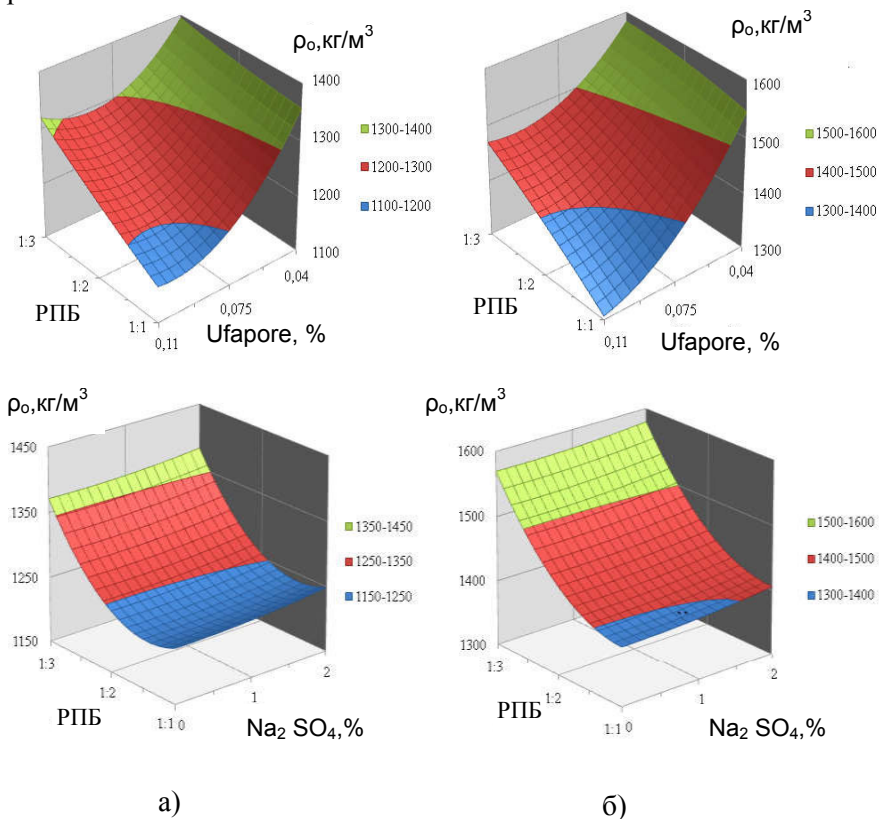


Рис.6.21. Поверхні відгуку середньої густини поризованих розчинів на основі РПБ, заповнювач: а – зола-винос; б – кварцовий пісок

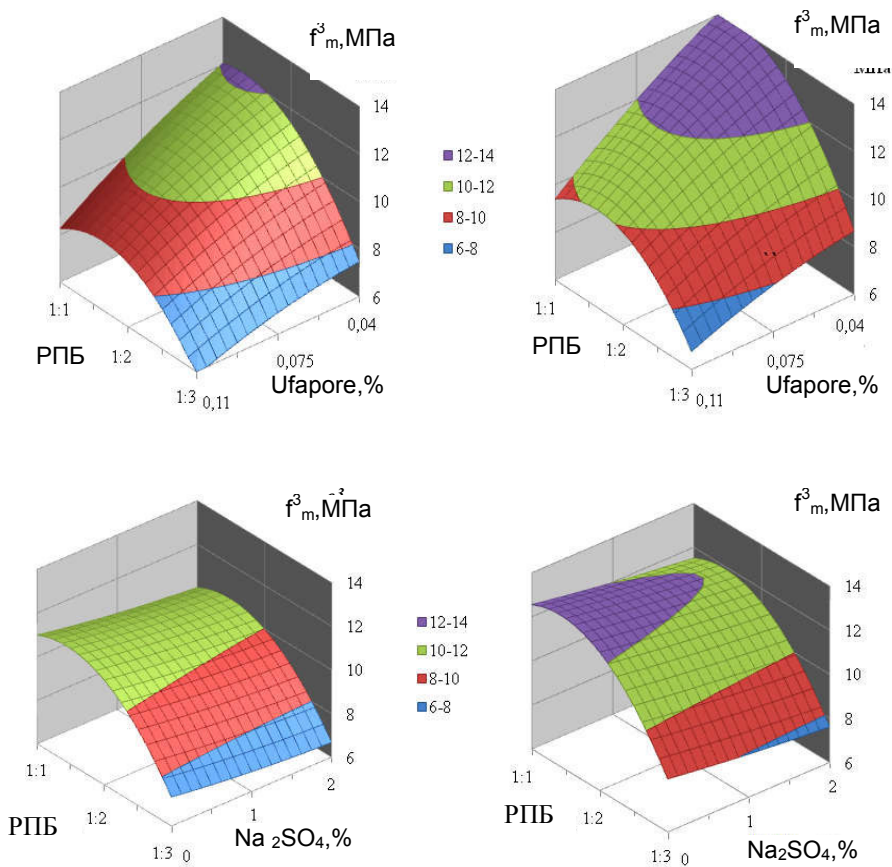


Рис. 6.22. Поверхні відгуку міцності поризованих розчинів у віці 3 діб на основі РПБ, (а) –зола-виносу; б) – кварцовий пісок

Аналізуючи міцність поризованих розчинів (рис.6.22, 6.23), можна зауважити, що як і слід було очікувати, вона залежить у першу чергу не від водов'язучого відношення, а від пористості розчину, яку можна оцінити за середньою густиною. Із збільшенням середньої густини міцність розчину зростає незалежно від складу розчину та виду заповнювача.

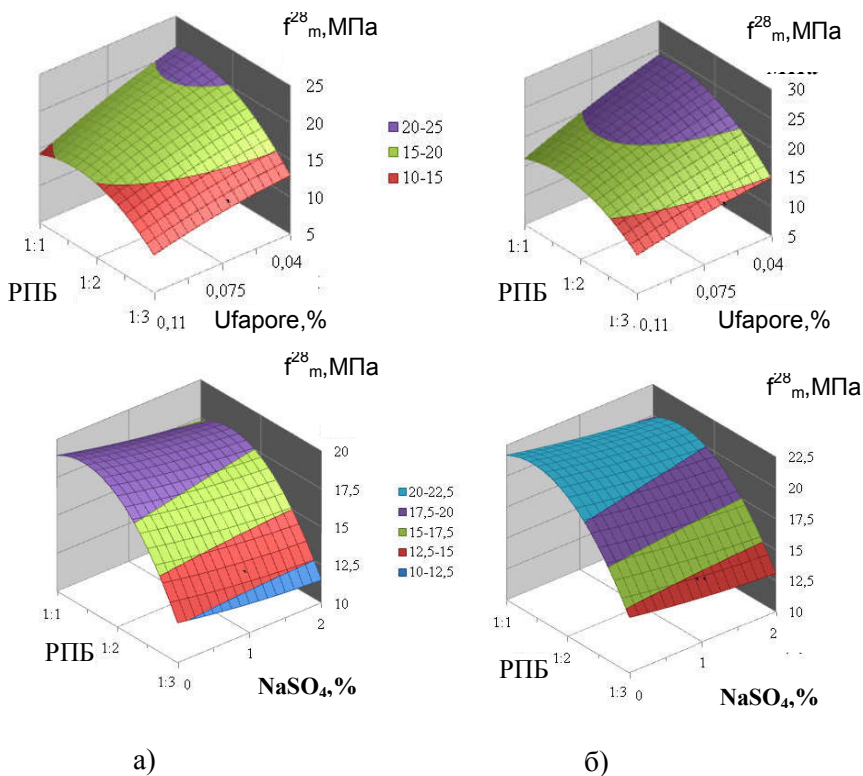


Рис. 6.23. Поверхні відгуку міцності поризованих розчинів у віці 28 діб на основі РПБ, заповнювач: а) – зола-виносу; б) – пісок

Для суміші на основі РПБ та золи-виносу характерна середня густина розчинів $1200...1400 \text{ кг/м}^3$ та міцність $13...20$ МПа. При цьому збільшення густини з 1200 до 1300 кг/м^3 супроводжується ростом міцності на $20...25\%$, при співвідношенні суміші "РПБ:Зап" $=1:1$, подальше збільшення середньої густини не призводить до суттєвого підвищення міцності.. Така ж залежність спостерігається за умови використання в якості заповнювача суміші кварцового піску, в цьому випадку отримують розчини міцністю $15...24$ МПа. В свою чергу для цементно-піщаних сумішей середня густина збільшується до $1310...1600 \text{ кг/м}^3$. Поризовані розчини складу РПБ:Зап $=1:2$ при збільшенні густини від 1210 до 1450 кг/м^3 характеризуються лінійним збільшенням міцності на $60...70\%$, максимальним значенням – 20 МПа та 24 МПа для заповнювачів золи-виносу та піску – відповідно. При збільшенні вмісту заповнювача (РПБ:Зап $=1:3$) маємо лінійне зменшення міцності при однаковій густині на обох видах заповнювачів. Прискорювач твердіння, який вводиться до складу суміші, призводить до росту ранньої міцності на $10...15\%$ та марочної до 10% .

На основі отриманих експериментальних даних (табл. 6.14) були запропоновані склади сухих будівельних сумішей для поризованих розчинів марок М100...М200 з використанням РПБ (табл.6.17).

Таблиця 6.17

Рекомендовані склади поризованих розчинів на РПБ

№ з/п	Марка розчину	$\rho_0, \text{кг/м}^3$	Вид заповнювача	Витрата, кг, на 1 т СБС			Витрата води при замішуванні, л
				РПБ	Заповнювач	UFAPORE	
1	М200	1500	пісок	285	715	0,4...0,5	100...120
2		1300	зола	350	650	0,4...0,5	140...150
3	М150	1350	пісок	310	690	0,9	110...130
4		1250	зола	300	700	1,1	160...170
5	М100	1200	зола	260	740	0,9...1,0	130...150

6.6. Суміші для наливних підлог

Для сучасного стану розвитку будівельної індустрії та будівництва на Україні характерне зростання інтересу та попиту на СБС для влаштування наливних підлог [204...206]. Особливістю таких підлог є швидкий набір міцності, що дозволяє експлуатувати їх відразу після укладання. Класифікація сумішей для влаштування підлог регламентується ДСТУ Б В.2.7-126:2011 „Суміші будівельні сухі модифіковані”, згідно цих діючих норм, до підлог ставляться високі вимоги щодо їх міцності – 15...35 МПа, при цьому розтічність розчину для підлог повинна бути не менше 17 см.

Для досліджень використано наступні матеріали: РПБ (ПЦ-I – 35%, зола-виносу – 15%, пісок фр. 0,16...1,25мм – 50%, суперпластифікатор MELFLUX 2651F), відсіяний кварцовий пісок з розмірами зерен 0,2...0,8 мм, водоутримуюча добавка – «Tylose», технічний хлорид кальцію $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Для вибору технологічних параметрів виготовлення СБС для підлог, виконано алгоритмізовані експерименти у відповідності з типовим планом Na_5 [198]. Умови планування експериментів представлені в табл. 6.18, матриця планування – табл. 6.19, результати експериментальних досліджень – табл. 6.20.

Таблиця 6.18

Умови планування експериментів при дослідженні сумішей для наливних підлог

Параметр	Фактор	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Пісок/ РПБ, мас	X_1	2	3	4	1
Вміст хлориду кальцію від маси РПБ, %	X_2	2	3	4	1
Вміст Melflux, % РПБ	X_3	0,2	0,4	0,6	0,2
Вміст Tylose, % РПБ	X_4	0,10	0,15	0,20	0,05
Вода/ РПБ,	X_5	0,40	0,45	0,50	0,05

Таблиця 6.19

Матриця планування експериментів Na₅

№ точки	Кодовані значення факторів					Натуральні значення факторів				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Пісок/ РПБ	Вміст хлориду кальцію, мас. %	Вміст Melflux 2651F, мас. %	Вміст Tylose, мас. %	Вода/ РПБ
1	+	+	+	+	+	4	3	0,6	0,20	0,55
2	-	-	+	+	+	2	1	0,6	0,20	0,55
3	-	+	-	-	-	2	3	0,2	0,10	0,45
4	+	-	-	-	-	4	1	0,2	0,10	0,45
5	-	+	-	+	+	2	3	0,2	0,20	0,45
6	+	-	-	+	+	4	1	0,2	0,20	0,55
7	+	+	+	-	-	4	3	0,6	0,10	0,45
8	-	-	+	-	-	2	1	0,6	0,10	0,45
9	-	+	+	+	-	2	3	0,6	0,20	0,45
10	+	-	+	+	-	4	1	0,6	0,20	0,45
11	+	+	-	-	+	4	3	0,2	0,10	0,55
12	-	-	-	-	+	2	1	0,2	0,10	0,55
13	-	+	+	-	+	2	3	0,6	0,10	0,55
14	+	-	+	-	+	4	1	0,6	0,10	0,55
15	+	+	-	+	-	4	3	0,2	0,20	0,45

Продовження табл. 6.19

№ точки	Кодовані значення факторів					Натуральні значення факторів				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Пісок/ РПБ	Вміст хлориду кальцію, мас. %	Вміст Melflux 2651F, мас. %	Вміст Tylose, мас. %	Вода/ РПБ
16	-	-	-	+	-	2	1	0,2	0,20	0,45
17	+	0	0	0	0	4	2	0,4	0,15	0,50
18	-	0	0	0	0	2	2	0,4	0,15	0,50
19	0	+	0	0	0	3	3	0,4	0,15	0,50
20	0	-	0	0	0	3	1	0,4	0,15	0,50
21	0	0	+	0	0	3	2	0,6	0,15	0,50
22	0	0	-	0	0	3	2	0,2	0,15	0,50
23	0	0	0	+	0	3	2	0,4	0,20	0,50
24	0	0	0	-	0	3	2	0,4	0,10	0,50
25	0	0	0	0	+	3	2	0,4	0,15	0,55
26	0	0	0	0	-	3	2	0,4	0,15	0,45
27	0	0	0	0	0	3	2	0,4	0,15	0,50
28	0	0	0	0	0	3	2	0,4	0,15	0,50
29	0	0	0	0	0	3	2	0,4	0,15	0,50

Таблиця 6.20

Результати експериментальних досліджень сумішей для само-
нівельованих підлог згідно матриці Na_2

№ Точ- ки	Розтічність (при випіканні з конусу Віка), мм	Термін придатності, (живучість), хв	Границя міцності, МПа					
			1 доба	3 доби	28 діб	1 доба	3 доби	28 діб
			Згин			Стиск		
1	170	115	3,25	5,41	8,87	5,19	11,20	20,09
2	220	175	3,55	6,01	11,09	7,45	14,76	19,93
3	180	125	3,43	5,21	9,53	5,91	12,14	15,93
4	155	110	2,93	3,33	5,91	3,73	8,46	14,21
5	195	145	3,55	5,39	9,61	6,53	12,94	16,73
6	175	140	2,25	2,43	4,23	2,07	6,02	10,69
7	180	130	3,33	5,31	9,27	5,93	12,12	20,77
8	230	135	3,87	6,35	11,57	7,27	14,76	21,01
9	215	130	4,25	7,53	13,19	8,55	16,30	23,15
10	185	150	2,47	3,53	5,77	3,41	8,30	14,95
11	175	150	2,83	3,61	6,69	4,59	9,76	16,27
12	195	120	3,61	5,29	9,75	5,73	12,20	15,79
13	225	180	4,05	7,11	12,75	7,69	15,14	21,87
14	200	140	3,07	4,19	7,09	4,83	10,38	17,99
15	160	135	2,67	3,47	5,93	3,61	8,48	15,11
16	185	125	3,21	4,71	8,91	5,67	11,84	14,23
17	190	140	3,00	4,20	7,54	4,68	10,17	18,06
18	215	125	3,84	6,24	11,62	7,36	14,59	20,38
19	195	115	3,30	5,40	9,64	6,12	12,47	19,34
20	195	145	3,00	4,50	8,20	5,14	11,05	16,70
21	225	140	3,33	5,73	10,06	6,37	12,98	20,22
22	185	140	2,91	4,23	7,68	4,81	10,34	15,12
23	190	143	3,18	5,05	9,10	5,71	11,88	18,32
24	195	142	3,42	5,29	9,72	6,11	12,52	19,44
25	215	167	3,18	5,05	9,26	5,80	11,28	18,52
26	185	130	3,66	5,83	10,54	6,62	14,08	21,22
27	190	135	3,24	5,13	9,34	5,88	12,15	18,79
28	195	138	3,25	5,41	8,87	5,19	11,20	20,09
29	190	132	3,55	6,01	11,09	7,45	14,76	19,93

На основі експериментальних даних одержані рівняння регресії міцності на згин та стиск самонівельованих наливних підлог на основі РПБ (6.1...6.7):

Міцність на згин у віці 1 доби, МПа:

$$R_{32}^1 = 3,24 - 0,42X_1 + 0,15X_2 + 0,21X_3 - 0,12X_4 - 0,24X_5 + 0,18X_1^2 - 0,09X_2^2 - 0,12X_3^2 + 0,06X_4^2 + 0,18X_5^2 + 0,02X_1X_2 - 0,03X_1X_3 - 0,07X_1X_4 - 0,06X_1X_5 + 0,09X_2X_3 + 0,13X_2X_4 - 0,02X_2X_5 + 0,02X_3X_4 - 0,05X_3X_5 + 0,02X_4X_5 \quad (6.1)$$

Міцність на згин у віці 3 доби, МПа:

$$R_{32}^3 = 5,13 - 1,02X_1 + 0,45X_2 + 0,75X_3 - 0,12X_4 - 0,39X_5 + 0,09X_1^2 - 0,18X_2^2 - 0,15X_3^2 + 0,04X_4^2 + 0,31X_5^2 + 0,09X_1X_2 - 0,05X_1X_3 - 0,08X_1X_4 - 0,10X_1X_5 + 0,21X_2X_3 + 0,19X_2X_4 - 0,04X_2X_5 + 0,06X_3X_4 - 0,17X_3X_5 + 0,03X_4X_5 \quad (6.2)$$

Міцність на згин у віці 28 діб, МПа:

$$R_{32}^{28} = 9,34 - 2,04X_1 + 0,72X_2 + 1,19X_3 - 0,31X_4 - 0,64X_5 + 0,24X_1^2 - 0,42X_2^2 - 0,47X_3^2 + 0,07X_4^2 + 0,56X_5^2 + 0,25X_1X_2 - 0,16X_1X_3 - 0,21X_1X_4 - 0,07X_1X_5 + 0,35X_2X_3 + 0,23X_2X_4 - 0,05X_2X_5 + 0,09X_3X_4 - 0,22X_3X_5 + 0,13X_4X_5 \quad (6.3)$$

Міцність на стиск у віці 1 доби, МПа:

$$R_{cm}^1 = 5,88 - 1,34X_1 + 0,49X_2 + 0,78X_3 - 0,20X_4 - 0,41X_5 + 0,14X_1^2 - 0,25X_2^2 - 0,29X_3^2 + 0,03X_4^2 + 0,33X_5^2 + 0,17X_1X_2 - 0,11X_1X_3 - 0,40X_1X_4 + 0,05X_1X_5 + 0,06X_2X_3 + 0,17X_2X_4 - 0,03X_2X_5 + 0,06X_3X_4 - 0,13X_3X_5 + 0,09X_4X_5 \quad (6.4)$$

Міцність на стиск у віці 3 доби, МПа:

$$R_{cm}^3 = 12,15 - 2,21X_1 + 0,78X_2 + 1,32X_3 - 0,32X_4 - 1,40X_5 - 0,39X_2^2 - 0,49X_3^2 + 0,05X_4^2 + 0,53X_5^2 + 0,34X_1X_2 - 0,16X_1X_3 - 0,52X_1X_4 + 0,08X_1X_5 + 0,11X_2X_3 + 0,29X_2X_4 - 0,05X_2X_5 + 0,09X_3X_4 - 0,24X_3X_5 + 0,14X_4X_5 \quad (6.5)$$

Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа:

$$\begin{aligned} R_{cm}^{28} = & 18,79 - 4,16X_1 + 1,32X_2 + 2,55X_3 - 0,56X_4 - 1,35X_5 + \\ & + 0,43X_1^2 - 0,77X_2^2 - 1,12X_3^2 + 0,09X_4^2 + 1,08X_5^2 + 0,48X_1X_2 - \\ & - 0,36X_1X_3 - 0,49X_1X_4 + 0,09X_1X_5 + 0,18X_2X_3 + 0,59X_2X_4 - \\ & - 0,08X_2X_5 + 0,12X_3X_4 - 0,31X_3X_5 + 0,40X_4X_5 \end{aligned} \quad (6.6)$$

Графічні залежності міцності при стиску від технологічних факторів приведені на рис. 6.24...6.27, теж, при згині – рис. 6.28. Із зростанням тривалості твердіння міцність при згині розчинів наливних підлог на основі РПБ зростає від 4,5 до 14,3 МПа, а міцність при стиску від 8,5 до 32 МПа; при цьому водов'язуче відношення становить біля 0,40, а розтічність розчину (при витіканні з конусу Віка), знаходиться в межах 215...230 мм. Характерне сповільнене зростання міцності у перші 3 доби твердіння може бути подолане за рахунок використання максимальної кількості прискорювача тужавлення при одночасному зниженні водопотреби розчину за рахунок застосування суперпластифікатора Melflux 2651F. Водоутримуюча здатність суміші для підлог забезпечується шляхом введення ефіру целюлози Tylose 60010 в кількості не менше 0,10%, а необхідний термін придатності розчинів – не менше 30 хв забезпечується строками тужавлення РПБ, для якого навіть у присутності значних кількостей хлориду кальцію початок тужавлення відбувається не раніше 60 хвилин.

Згідно отриманих даних, розчини на основі сухих сумішей для наливних підлог за основними технічними характеристиками (міцністю, терміном придатності, розтічністю та ін.) можна віднести до групи сумішей для улаштування стяжок та покриттів підлог (СТ1, СТ2, СТ3, ПО1, ПО2, ПО3) у відповідність з класифікацією сумішей для влаштування підлог.

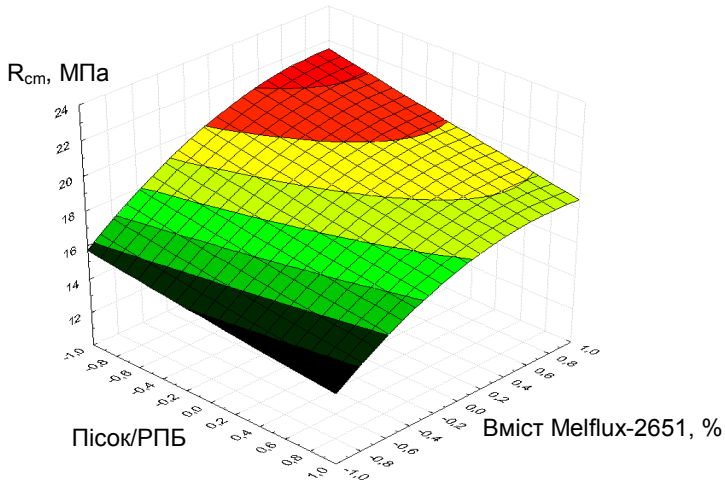


Рис.6.24. Залежність міцності при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від співвідношення піску і РПБ (X_1) і вмісту Melflux 2651F (X_3), ($X_2=X_4=X_5=0$)

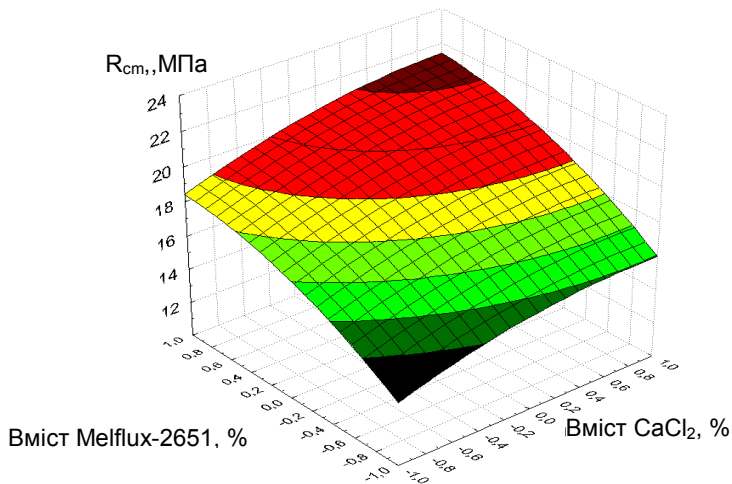


Рис. 6.25. Залежність міцності при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від вмісту Melflux 2651F (X_3) і вмісту хлориду кальцію (X_2), ($X_1=X_4=X_5=0$)

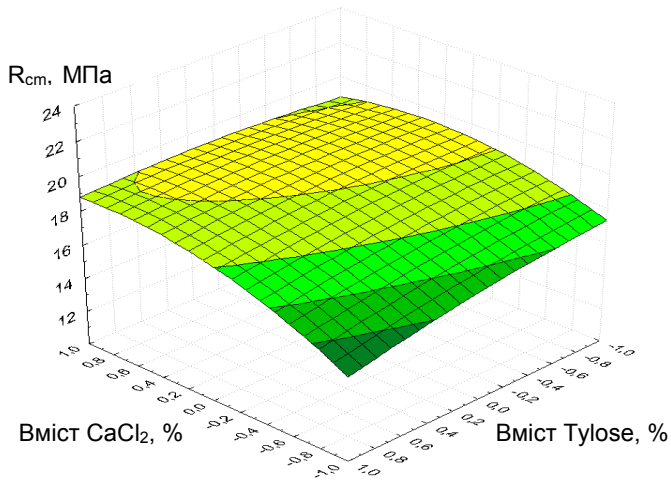


Рис. 6.26. Залежність міцності при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від вмісту хлориду кальцію (X_2) і вмісту Tylose (X_4), ($X_1 = X_3 = X_5 = 0$)

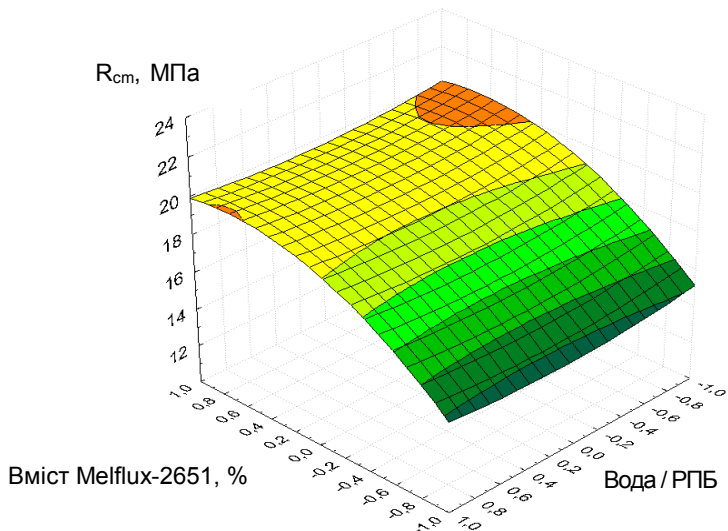


Рис.6.27. Залежність міцності при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від вмісту Melflux 2651F (X_3) і співвідношення води і РПБ (X_5), ($X_1 = X_2 = X_4 = 0$)

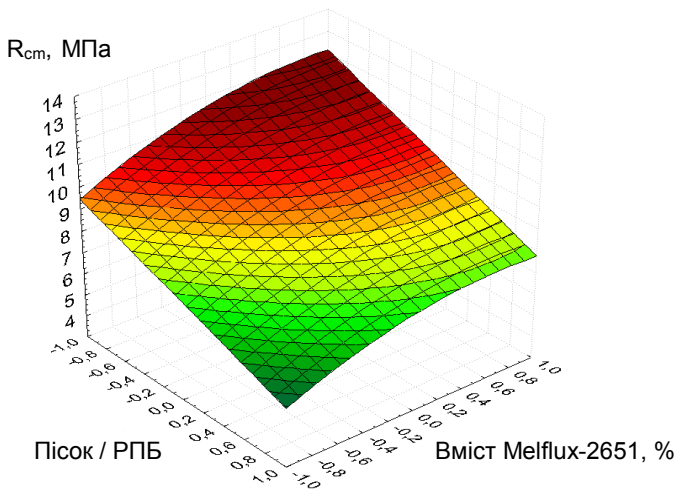


Рис. 6.28. Залежність міцності при згині розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від співвідношення піску і РПБ (X_1) і від вмісту Melflux 2651F (X_3), ($X_2=X_4=X_5=0$)

6.7. Суміші для конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів

В сучасному будівництві поряд з високоміцними визначається тенденція до використання енергоефективних будівельних матеріалів і зокрема легких бетонів і розчинів. Одним з основних видів легких бетонів є керамзитобетони. При максимальній крупності керамзитового гравію 5 мм керамзитобетони можна віднести до легких розчинів.

Для виконання експериментів були використані поряд з цементно-зольними РПБ, склад якого вказаний раніше, кварцовим піском, також керамзитовий гравій, що мав наступну характеристику: фракція 0...5 мм, насипна густина 690 кг/м³ (марка 700), водопоглинання – 14.5%, міцність при стисканні у циліндрі – 3,6 МПа (марка П150).

З метою вивчення впливу факторів складу на міцнісні характеристики керамзитобетону, а також встановлення

оптимальних параметрів виготовлення таких бетонів, основні дослідження були виконані за допомогою експериментів, алгоритмізованих відповідно до плану В₃ [198]. Умови планування експериментів наведені в табл. 6.21.

В якості вихідних параметрів прийнято міцність керамзитобетону на стиск у віці 7 та 28 діб нормального твердіння та його середню густину, а також легкоукладальність бетонної суміші.

Таблиця 6.21

Умови планування експериментів при дослідженні
керамзитобетонів

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	100
Витрата РПБ, кг/м ³	X ₁	300	400	500	0,1
В/Ц	X ₂	0,3	0,4	0,5	
Об'ємна концентрація керамзиту, V _к	X ₃	0,1	0,2	0,3	0,1

Основні експериментальні результати досліджень керамзитобетону наведені в табл. 6.22 та на рис. 6.29...6.37.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі міцності на стиск та середньої густини у вигляді поліноміальних рівнянь регресії :

1. Середня густина керамзитобетону, кг/м³

$$\rho_0 = 1436,8 + 18,5 \cdot x_1 + 0,5 \cdot x_2 - 88 \cdot x_3 - 2,5 \cdot x_1 x_3 + 10 \cdot x_2 x_3 - 5,54 \cdot x_1^2 - 0,54 \cdot x_2^2 - 3,04 \cdot x_3^2 \quad (6.7)$$

2. Міцність керамзитобетону на стиск, МПа

– у віці 7 діб:

$$R_{cm}^7 = 8,56 + 1,8 \cdot x_1 - 0,41 \cdot x_2 - 0,52 \cdot x_3 - 0,08 \cdot x_1 x_2 - 0,45 \cdot x_1 x_3 - 0,50 \cdot x_2 x_3 - 0,38 \cdot x_1^2 - 0,13 \cdot x_2^2 - 0,47 \cdot x_3^2 \quad (6.8)$$

– у віці 28 діб:

$$R_{cm}^{28} = 17,37 + 2,31 \cdot x_1 - 0,38 \cdot x_2 - 0,59 \cdot x_3 + \\ + 0,83 \cdot x_1 x_2 - 0,31 \cdot x_1 x_3 - 0,20 \cdot x_2 x_3 + \quad (6.9) \\ + 0,14 \cdot x_1^2 - 0,44 \cdot x_2^2 - 0,10 \cdot x_3^2$$

Таблиця 6.22

Експериментальні результати досліджень керамзитобетону

№ точ.	Склад бетону			Витрата води В, л/м ³	ОК, см	Середня густина, ρ _б , кг/м ³	Міцність на стиск, МПа	
	РПБ кг/м ³	В/Ц	V _к				7 діб	28 діб
1	500	0,5	0,3	250	18	1380	7,0	18,5
2	500	0,5	0,1	250	22	1500	11,0	24,5
3	500	0,3	0,3	150	7	1350	10,0	22,0
4	500	0,3	0,1	150	9	1550	10,0	24,3
5	300	0,5	0,3	150	8	1320	5,2	13,2
6	300	0,5	0,1	150	11	1490	5,4	13,0
7	300	0,3	0,3	90	0	1330	5,9	15,1
8	300	0,3	0,1	90	1	1500	6,1	16,0
9	500	0,4	0,2	200	16	1455	9,5	18,6
10	300	0,4	0,2	120	4	1410	6,9	16,6
11	400	0,5	0,2	200	14	1460	8,1	16,7
12	400	0,3	0,2	120	4	1415	8,8	17,4
13	400	0,4	0,3	160	8	1325	7,7	16,4
14	400	0,4	0,1	160	10	1545	8,5	18,3
15	400	0,4	0,2	160	9	1425	8,4	17,1
16	400	0,4	0,2	160	10	1430	8,6	17,3
17	400	0,4	0,2	160	9	1435	8,5	17,1

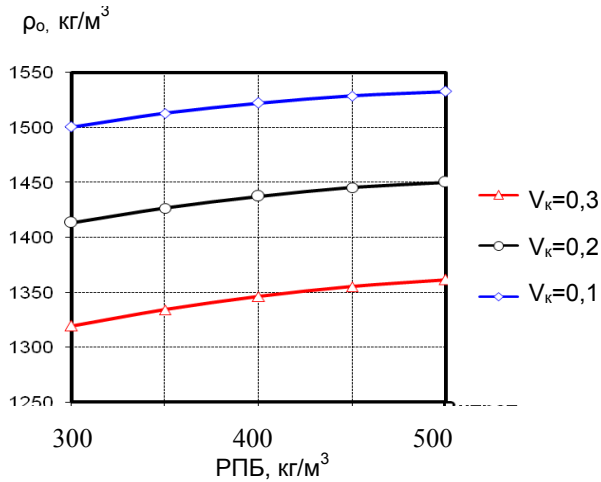


Рис. 6.29. Графік залежності середньої густини керамзитобетонних зразків, при різній об'ємній концентрації керамзиту

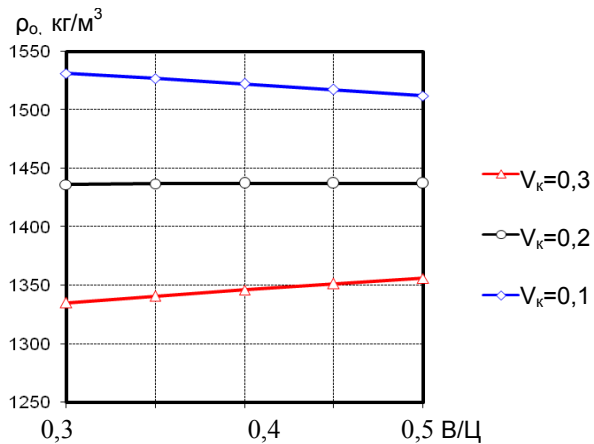


Рис. 6.30. Графік залежності середньої густини керамзитобетонних зразків від В/Ц, при різній об'ємній концентрації керамзиту

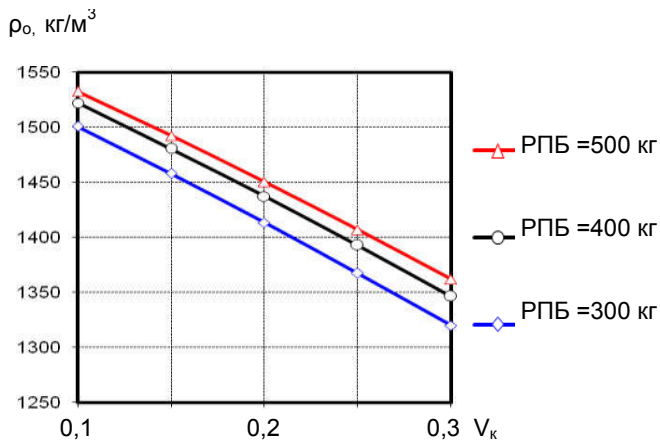


Рис. 6.31. Графік залежності середньої густини керамзитобетонних зразків від об'ємної концентрації керамзиту, при різному вмісті РПБ

Аналізуючи графіки, отримані на основі експериментально-статистичних моделей, які наведені на рис.6.29-6.31 приходимо до висновку, що найбільший вплив на середню густину керамзитобетону має об'ємна концентрація керамзиту у бетоні. У меншій мірі на середню густину впливає витрата РПБ, зі збільшенням вмісту якого густина керамзитобетону збільшується. Також на середню густину керамзитобетону має незначний вплив вмісту води у бетонній суміші при збільшенні якого густина зменшується. При більшій об'ємній концентрації керамзиту збільшення вмісту води викликає незначне збільшення густини, оскільки керамзитові зерна вбирають і утримують вологу затруднюючи випаровування води.

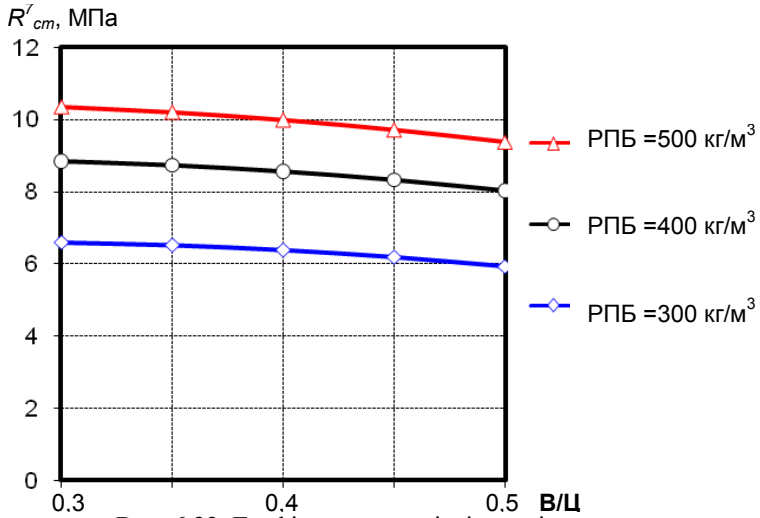


Рис. 6.32. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 7 діб від В/Ц, при різному вмісті РПБ у бетоні

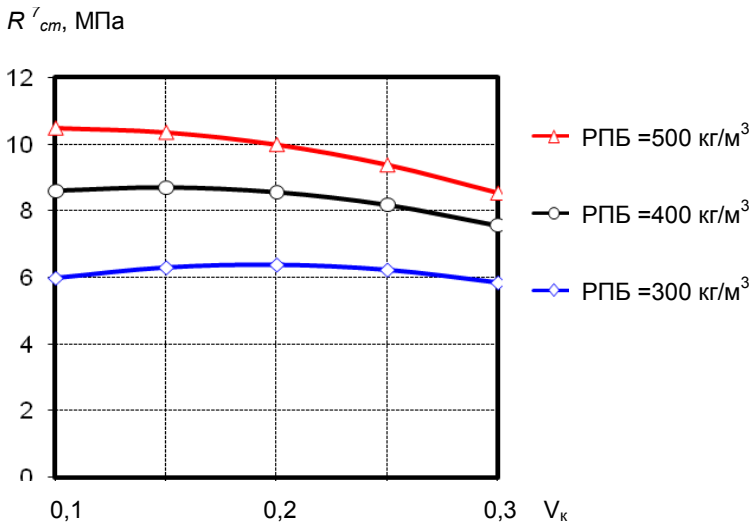


Рис. 6.33. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 7 діб від об'ємної концентрації керамзиту, при різному вмісті РПБ у бетоні

Найбільший вплив на міцність керамзитобетону у ранньому віці (7 діб) має вміст РПБ та керамзиту (об'ємної концентрації) у бетоні (рис. 6.32, 6.33). Відповідно при збільшенні вмісту РПБ практично лінійно збільшується міцність керамзитобетонних зразків, а при збільшенні вмісту керамзиту у бетоні, міцність зменшується. Витрата води в меншій мірі впливає на міцність, зі збільшенням вмісту води міцність зменшується (рис. 6.32).

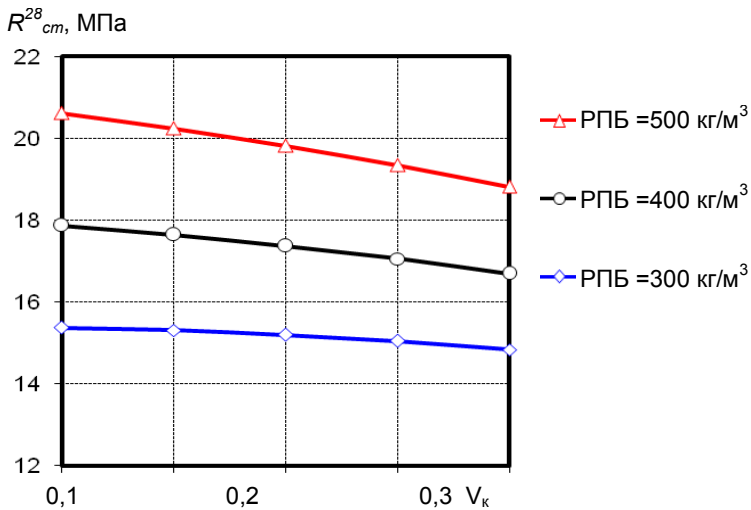


Рис. 6.34. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 діб від об'ємної концентрації керамзиту, при різному вмісті РПБ

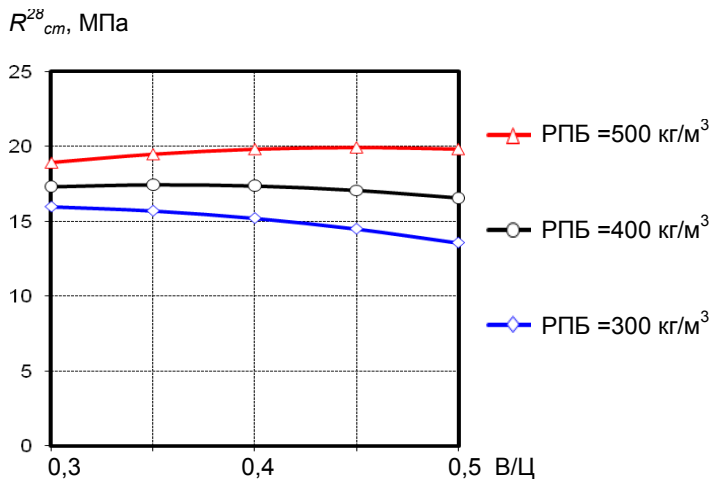


Рис. 6.35. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 днів від В/Ц, при різному вмісті РПБ

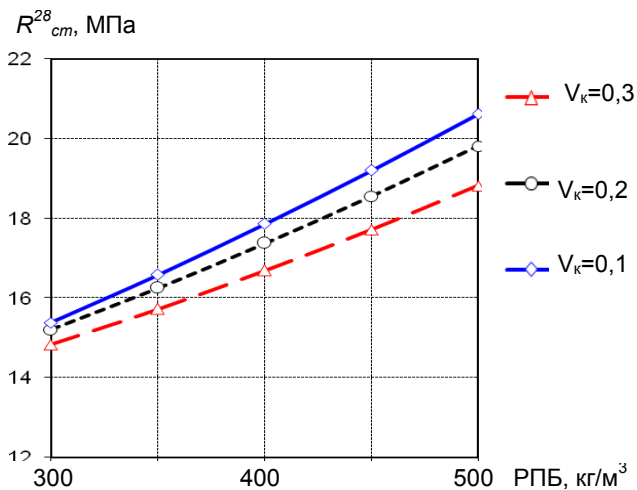


Рис. 6.36. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 днів від витрати РПБ, при різній об'ємній концентрації керамзиту

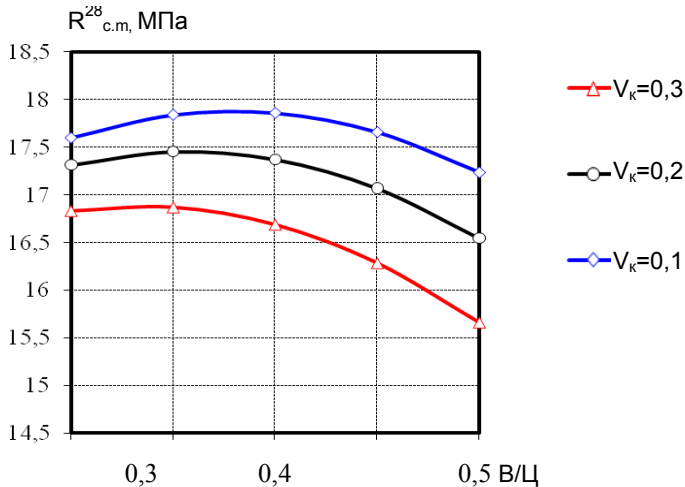


Рис. 6.37. Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 днів від В/Ц, при різній об'ємній концентрації керамзиту

Аналізуючи графіки, наведені на рис.6.33-6.37 приходимо до висновку, що найбільш суттєвий вплив на міцність керамзитобетону у віці 28 днів має вміст РПБ. Відповідно при збільшенні частки РПБ у бетоні утворюється більш щільніший каркас, що супроводжує збільшення міцності керамзитобетонних зразків. При цьому більш значний ефект спостерігається при мінімальній об'ємній концентрації керамзиту. В свою чергу кількість керамзиту (об'ємна концентрація) у бетоні також чинить значний вплив на марочну міцність. При збільшенні його частки, міцність зменшується оскільки при більшій об'ємній концентрації керамзиту у бетоні утворюється каркас із легкого заповнювача, який саме і руйнується.

В/Ц має неоднозначний вплив на міцність керамзитобетону. Більш суттєвий вплив спостерігається при підвищеній об'ємній концентрації керамзиту $V_k=0,3$, при збільшенні В/Ц з 0,3 до 0,5 міцність зменшується на 10...15%. Однак при зменшенні частки керамзиту до 0,1 міцність суттєво не зменшується.

Рекомендовані склади керамзитобетонів на основі РПБ. На основі отриманих експериментальних даних були запропоновані склади керамзитобетонів В10...В25.

Таблиця 6.23

Рекомендовані склади керамзитобетонів

№ з/п	Клас бетону	ρ_0 , кг/м ³	Витрата компонентів на 1 м ³ керамзитобетону			Витрата води, л
			РПБ, кг	П, кг	Об'ємна концентрація керамзиту, V_k	
1	В25	1550	500	760	0,1	200...220
2	В20	1550	400	760	0,1	200...220
3	В15	1450	300	840	0,2	220...230
4	В10	1350	300	900	0,3	230...240

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сухие смеси в современном строительстве / [Безбородов В. А., Белан В. И., Мешков П. И. и др.] – Новосибирск, 1998. – 95 с.
2. Рунова Р. Ф. Технологія модифікованих будівельних розчинів: [підруч. для студ. вищ. навч. закл.] / Р. Ф. Рунова, Ю. Л. Носовський . – К: Видавництво КНУБіА, 2007. – 256 с.
3. Сучасні композиційні будівельно-оздоблювальні матеріали / [Захарченко П. В., Долгий Е. М., Галаган Ю. О. та ін.] – К, 2005. – 512 с.
4. Сучасні композиційні будівельно-оздоблювальні матеріали / [Захарченко П. В., Долгий Е. М., Галаган Ю. О. та ін.] – К, 2005. – 512 с.
5. Добавки в бетон / [Рамачандран В. С., Фельдман Р. Ф., Коллепарди М. и др.]; под. ред. В. С. Рамачандрана. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
6. Ребиндер П. А. Поверхностно-активные вещества / Ребиндер П. А. – М.: Знание, 1961. – 116 с.
7. Ахмедов К.С. Роль полимерных добавок в процессах твердения цемента / Ахмедов К. С., Глекель Ф. Л., Копп Р. С. // Шестой международный конгресс по химии цемента. Т.3. – М.: Стройиздат. – С. 308 – 310.
8. Рамачандран В. С. Добавки в бетон / В. С. Рамачандран, Р. Ф. Фельдман, М. Коллепарди и др.// Справ. пособие/; Под ред. В. С. Рамачандрана. – М. : Стройиздат, 1988. – С. 168–184.
9. Kobayashi M., Utilization of fly – ash and its problems in USE in Japan // Proc. Japan – USA Science Seminar, San Francisco, – 1979. – P. 61 – 69.
10. Ли Ф. М. Химия цемента и бетона / Ф. М. Ли // – М. : Стройиздат, 1961. – 642 с.
11. Усов Б. А. Сухие строительные смеси на основе молотого портландцемента с кварцосодержащими микронаполнителями // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI. – 2003. – №7. – С. 14 – 15.

12. Колмыкова Е. Е. Исследование процессов структурообразования в цементном тесте / Е. Е. Колмыкова, Н. В. Михайлов // Бетон и железобетон, 1957, № 4, С. 118–126.
13. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов // – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
14. Юнг В. Н. Основы технологии вяжущих веществ // М. : Промстройиздат, 1951. – 355 с.
15. Пантелеев А. С. Цементы с микронаполнителями: Сб. тр. ВХО им. Д. И. Менделеева. Т. VI. – №6. – С. 362–367.
16. Венюа М. Цементы и бетоны в строительстве / М. Венюа. – М. : Стройиздат, 1980. – 415 с.
17. Зозуля П. В. Оптимизация гранулометрического состава и свойств заполнителей и наполнителей для сухих строительных смесей // Сборник «3-я Международная конференция «Сухие строительные смеси для XXI века: Технологии и бизнес». СПб, 2003. – С. 12–13.
18. Дворкин Л. И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. / Л. И. Дворкин, В. И. Соломатов, В. Н. Выровой // – К. : Будівельник, 1991 – 136 с.
19. Пантелеев А. С. Цементы с минеральными добавками / А. С. Пантелеев, В. Н. Колбасов //Новое в химии и технологи бетона. – М. : Стройиздат, 1971. – С. 155–164.
20. Будников П. П. О гидратации алюмосодержащих минералов портландцемента в присутствии карбонатных микронаполнителей / П. П. Будников, И. М. Колбасов, А. С. Пантелеев // Цемент. – 1961. – №1. – С. 13–16.
21. Баженов Ю. М Модифицированные высококачественные бетоны / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников // – М. : Изд-во АСВ, 2006 – 368 с.
22. Басин В. Е. Адгезионная прочность / В. Е. Басин // – М. : Химия, 1981. – 208 с.
23. Массачца А. Химия пуццолановых добавок и смешанных цементов / А. Массачца // 6-й Международный конгресс по химии цемента. – М. : Стройиздат, 1976. – Т.3. – С. 209–211.
24. Дворкин Л. И. Строительные минеральные вяжущие материалы / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин . – М. : Инфра-Инженерия, 2011. – 544 с.

25. Будников П. П. О гидратации алюмосодержащих минералов портландцемента в присутствии карбонатных микронаполнителей / П. П. Будников, И. М. Колбасов, А. С. Пантелеев // Цемент. – 1961. – №1. – С. 13–16.
26. Полак А. Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ / А. Ф. Полак // – М. : Стройиздат, 1976. – 208 с.
27. Гиббс Д. Термодинамические работы. – М. : Гостехиздат. – 1950. – 492 с.
28. О механизме влияния тонкомолотых добавок на свойства цементного камня/Ф. Д. Овчаренко, В. И. Соломатов, В. М. Казанский и др. // Докл. / АН СССР. – Т. 284. - №2. – 1985. – С. 318–403.
29. Физико-химическая механика дисперсных структур / Под ред. П. А. Ребиндера. – М. : Наука, 1966. – 400 с.
30. Сергеев А. М. Использование в строительстве отходов энергетической промышленности. – К. : Будівельник. – 1984. – 120 с.
31. Каприелов С. С. Научные основы модифицирования бетонов ультрадисперсными материалами: Диссертация д-ра техн. наук. М. : – 1995. 41 с.
32. Дворкин Л. И. Эффект активных наполнителей в пластифицированных цементных бетонах / Л. И. Дворкин // Изв. вузов. Стр-во и архитектура – 1988 – № 9. – С. 53–57.
33. Сычев М. М. Перспективы повышения прочности цементного камня / М. М. Сычев // Цемент, 1987, № 9. – С. 17–19.
34. Сватовская Л. Б. Активированное твердение цемента / Л. Б. Сватовская, М. М. Сычев – Л. : Стройиздат. – 1983. – 160 с.
35. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов // – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
36. Горностаева Т. А. Активный наполнитель для бетона // Строительный эксперт. – №14 (177). – 2004. – С. 3–5.
37. Сычев М. М. О роли «наполнителя» в формировании свойств композиций связка-наполнитель / М. М. Сычев, Г. М. Барвинок, С. Р. Касабян // ЖПХ. – №1. – 1983. – С. 207–210.
38. Любимова Т. Ю. Влияние кварцевого заполнителя на кинетику твердения минеральных вяжущих веществ /

Т. Ю. Любимова, Н. В. Михайлов, П. А. Ребиндер // Докл. АН СССР. – Т. 162. – №1. – 1968. – С. 144–147.

39. Красный И. М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей // Бетон и железобетон. – 1987. – № 5. – С. 10–11.

40. Зоткин А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне / Бетон и железобетон. – 1994. – № 3. – С. 7–9.

41. Власов В. К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. – 1993. – № 4. – С. 10–12.

42. Каприелов С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов // Бетон и железобетон, – 1995. – № 6. – С. 16–20.

43. Roberts L. R., Grace W. R. Microsilica in concrete.1 // Mater. Sci. Concr.1. – Westerville (Ohio), 1989. – pp.197–222.

44. Bendz Dale P., Garfodzi Edward J. Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone//ACI Mater.J – 1991. – V88. – № 8. – pp. 518–529.

45. Larbi J. A., Bijen J. M. The chemistry of the pore fluid of silica fume-blended cement systems //Cem. and Concr. Res. – 1990. – V20. – № 4. – pp. 506–516.

46. Каприелов С. С. Микрокремнезем в бетоне / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд // Обзор. инфор. М. : ВНИИТПИ. – 1993. 38 с.

47. Джакупов К. К. Облицовочные материалы на основе отходов камнепиления известняка ракушечника : Афтореф. диссертации канд. тех. наук. – Самара. – 1996. – 28 с

48. Каприелов С. С. Свойства бетонов с добавкой ультрадисперсных отходов ферросплавного производства / С. С. Каприелов, Н. Ю. Похлебкина и др. // Химические добавки для бетонов. М. : НИИЖБ. – 1987. – С. 34–38.

49. Ольгинский А. Г. Пылеватые минеральные добавки к цементным бетонам. // Строительные материалы и конструкции. – 1990. – № 3. С. 18.

50. Бабков В. В. О некоторых закономерностях связи структуры и прочности бетона / В. В. Бабков,

Р. И. Барангулов, А. А. Ананенко и др. // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1983. – № 2. – С. 12–20.

51. Соломатов В. И. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В. И. Соломатов и др. // Киев : Будивельник. – 1991. – 241 с.

52. Кокубу И. М. Зола и зольные цементы / И. М. Кокубу // Пятый международный конгресс по химии цемента. – М. : Стройиздат, 1973. – С. 405–416.

53. Циолосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. – Тбилиси: Мицнерсба, 1979. – 228 с.

54. Зоткин А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне / Бетон и железобетон. – 1994. – № 3. – С. 7–9.

55. Власов В. К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. – 1993. – № 4. – С. 10–12.

56. Каприелов С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов // Бетон и железобетон, – 1995. – № 6. – С. 16–20.

57. Рамачандран В. С. Добавки в бетон / В. С. Рамачандран, Р. Ф. Фельдман, М. Коллепарди и др. // Справ. пособие; Под ред. В. С. Рамачандрана. – М. : Стройиздат, 1988. – С. 168–184.

58. Roberts L. R., Grace W. R. Microsilica in concrete.1 // Mater. Sci. Concr.1. – Westerville (Ohio), 1989. – pp.197–222.

59. Bendz Dale P., Garfodzi Edward J. Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone // ACI Mater. J. – 1991. – V88. – № 8. – pp. 518–529.

60. Larbi J. A., Bijen J. M. The chemistry of the pore fluid of silica fume-blended cement systems // Cem. and Concr. Res. – 1990. – V20. – № 4. – pp. 506–516.

61. Зоткин А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне / Бетон и железобетон. – 1994. – № 3. – С. 7–9.

62. Власов В. К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. – 1993. – № 4. – С. 10–12.

63. Каприелов С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой

ультрадисперсных материалов // Бетон и железобетон, – 1995. – № 6. – С. 16–20.

64. Стольников В. В. Использование золы-уноса от сжигания пылевидного топлива на тепловых электростанциях – Л. : Энергия. – 1989. – 50 с.

65. Ковач Р Процессы гидратации и долговечности зольных цементов // Шестой Международный конгресс по химии цементов – М. : Стройиздат. – 1976. – Т. 3. – С. 91–102.

66. Горчаков Г И. Структура и морозостойкость гидротехнического бетона с добавкой золы-уноса ТЭС / Г. И. Горчаков, А. Б. Набоков, С. Ф. Притула // Материалы конф. и совещаний по гидротехнике – Л. : Энергия. – 1978 – вып 118. – С. 80–85.

67. Басин В. Е. Адгезионная прочность. – М. :Химия, 1981. – 208 с.

68. Соломатов В. И., Тахиров М. К., Тахер Шах. Интенсивная технология бетонов. – М.: Стройиздат, 1989. – 264 с.

69. Соломатов В.И. Пути активизации наполнителей композиционных строительных материалов / Соломатов В.И., Дворкин Л.И., Чудновский С. М. // Изв. вузов: Строительство и архитектура. – 1987. – N1 – С. 60 – 63

70. Дворкин Л. И. Цементно-зольные бетоны с добавками полифункциональных модификаторов (ПФМ) для покрытия полов промышленных и гражданских зданий / Дворкин Л. И., Макаренко Р. Н., Кизима В. П. – Ровно.: УГУВХП, 2002. –110 с.

71. Хигерович М. И. Замена извести в строительных растворах гидрофобизирующим карбонатным пластификатором / М. И. Хигерович, Н. В. Никитин // Цемент – 1958 – № 5. – С. 25–34.

72. Шестоперов С. В. Вечный бетон / С. В. Шестоперов // Химия и жизнь. – 1983. – № 2. – С. 16.

73. Метакалін в будівельних розчинах і бетонах [Дворкін Л. Й., Рунова Р. Ф., Лушнікова Н. В., Троян В. В.] – КНУБіА, 2007. – 216с.

74. Элинзон М. П. Топливосодержащие отходы промышленности в производстве строительных материалов / Элинзон М. П., Васильков С. Г. – М.: Стройиздат, 1980. – 234 с.

75. Бабачев Г. Зола и шлаки в производстве строительных материалов / Бабачев Г. – К.: Будивельник, 1987. – 136 с.

76. Дворкин Л. И. Использование золы-унос ТЭС для приготовления бетонов и растворов при строительстве АЭС/ Дворкин Л. И., Пресман И. Г. – Информэнерго. – М., 1987. – 52 с.

77. Кокубу И. М. Цементы с добавкой золы / Кокубу И. М., Ямада Д. // Шестой международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976, Т.3. – С. 83–94.

78. Лещинский М. Ю. Влияние золы-уноса на свойства бетона /Лещинский М. Ю. // Строительные материалы и конструкции. – 1986. – N2 – С. 18.

79. Рекомендации по применению в бетонах золы, шлака и золошлаковой смеси тепловых электростанций / НИИЖБ. – М.: 1986. – 78 с.

80. Саницький М. А. Структуроутворення композиційних портландцементів з хімічними додатками / Саницький М. А., Шевчук Г. Я., Хаба П. М. // Хімія, технологія речовин та їх застосування. – Вісник Державного університету “Львівська політехніка”.– Львів, 1997. – №316. – С. 195–197.

81. Золомісні портландцементи та бетони на їх основі / Саницький М. А., Марків Т. Є., Новицький Ю. Л. [та ін.] // Матеріали V-го семінару “Структура, склад та властивості бетону”.– Рівне, 2006. с.

82. Стольников В. В. Использование золы-уноса от сжигания пылевидного топлива на тепловых электростанциях / Стольников В. В. – Л.: Энергия, 1989. – 50 с.

83. Рунова Р. Ф. Использование промышленных отходов в производстве сухих строительных смесей: возможности и проблемы Рунова Р. Ф. // Сб.докл. конф. "Современные технологии сухих строительных смесей." – К.:2004. – С. 72–79.

84. Соломатов В. И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / Соломатов В. И., Сецев В. П. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.

85. Дворкин Л. И. Эффект активных наполнителей в пластифицированных цементных бетонах / Дворкин Л. И. // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1988. –N9, – С. 53–57.

86. Сычев М. М. Перспективы повышения прочности цементного камня / Сычев М. М. // Цемент, 1987, №9. – С. 17-19.

87. Ли Ф. М. Химия цемента и бетона / Ли Ф. М. – М.: Стройиздат, 1961. – 642 с.

88. Смит А. Э. Современный подход к применению золы-уноса в бетоне / Смит А. Э. // Технология товарной бетонной смеси. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 18 – 24.

89. Ковач Р. Процессы гидратации и долговечности зольных цементов / Ковач Р. // Шестой Международный конгресс по химии цементов. – М.: Стройиздат, 1976. – т.3. – С. 91 – 102.

90. Судаков В. Б. Рациональное использование бетона в гидротехнических сооружениях / Судаков В. Б. – М.: Энергия, 1976. – 240 с.

91. Lane R. O. Properties and use of fly ash in portland cement concrete / Lane R. O, Best S.F. // Concrete international. – 4(7). – 1982. – P 81–92.

92. Сергеев А. М. Использование в строительстве отходов энергетической промышленности / Сергеев А. М. – К.: Будівельник, 1984. – 120 с.

93. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л. И. Дворкин, В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, С. М. Чудновский. Под ред. Л. И. Дворкина, – К.: Будивельник, 1991. – 136 с.

94. ГОСТ 25818-91 Зола для бетонов и растворов. Технические условия.

95. Степанян В. А. Нормальное сцепление раствора с камнем / Степанян В.А. – Ереван, 1950. – 240 с.

96. Дворкин Л. И. Эффективные цементно-зольные бетоны / Дворкин Л. И., Дворкин О. Л., Корнейчук Ю. А. – Ровно. – 1998. – 195 с.

97. Ramachandran V. S. Adsorption and hydration behavior of tricalcium aluminate-water and tricalcium aluminate – gypsum-water systems in the presence of superplasticizers / J.Am Concr. Inst. – 1983. – 80 – P. 235 – 241.

98. Гарнаруцкий Г. М. О механизме действия пластификаторов в цементно-водных системах / Гарнаруцкий Г. М., Юдович Б. Э. // Труды НИИ цемента. – Новые эффективные виды цемента – 1981. – с. 114 – 148.

99. Ратинов В. Б. Добавки в бетон / Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.
100. Roy D. Effect of Admixtures upon Electrokinetic phenomena during hydration of C3S.C3A and port - land cement / Roy D, Daimon M. // 7th intern Congr. Chem. Cements. – Paris. – vol II, – 1980. – P 242 – 246.
101. Eriksen K., Nepper – Christensensen P. Experiences in the USE of Superplasticisers in some special fly-ash concretes / Eriksen K., Nepper - Christensensen P. // Amer. Concr. inst., SP –68. – 1981. – 1981. –p1 –20.
102. Соломатов В. И. Полимерцементные бетоны и пластбетоны / Соломатов В. И. – М.: Стройиздат, 1967. – 184 с.
103. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. Адгезия / Б.В. Дерягин , Н.А. Кротова .- Изд. АН СССР, 1949.- 12 с.
104. Кротова Н.А. О склеивании и прилипании / Н.А.Кротова .- Изд. АН СССР, 1956.- 91 с.
105. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона / Ахвердов И. Н. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
106. Энтин З. Б. О гидратации и твердении цементов с золой/Энтин З. Б., Ящина Е. Т., Лепешенкова Г. Г., Рязанцева Н. З. // Шестой международный конгресс по химии цемента – М.: Стройиздат, 1976. Т 3. – С. 95 – 99.
107. Урьев Н. В. Высококонцентрированные дисперсные системы / Урьев Н. В. - М.: Химия – 1980. – 320 с.
108. Бутт Ю. В. Практикум по технологии вяжущих веществ/Бутт Ю. В., Тимашев В. В. М.: Высш. шк., 1973. – 504 с.
109. Вознесенский В. А. Численные методы решения строительно – технологических задач / Вознесенский В. А., Ляшенко Т. В, Огарков Б. Л. – К.: Вища шк. 1989 – 328 с.
110. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Под ред. П.Г.Шпыновой. – Львов.: Вища шк., 1981 – 157 с.
111. Венюа М. Цемент и бетоны в строительстве / Венюа М. – М.: Стройиздат, 1980. – 415 с.
112. Мехта П. К. Минеральные добавки / Мехта П. К. // Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1988. – 260 – 295 с.

113. Физико-химическая механика дисперсных систем / Под ред. П. А. Ребиндера. – М.: Наука, 1966 – 400 с.
114. Колмыкова Е. Е. Исследование процессов структурообразования в цементном тесте / Колмыкова Е. Е., Михайлов Н. В. // Бетон и железобетон, 1957, №4. – С. 118–126.
115. Холстед П. Е. Кинетика реакций в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ / Холстед П. Е., Лоуренс С. Д. // Труды 4-го конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1964. – С. 261–264.
116. Влияние СП на твердение цемента / Калашников В. И., Баженов Ю. М., Демьянов В. С [и др.] // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2001, №1. – С. 28–29.
117. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны / Батраков В. Г. – М.: Стройиздат, 1990. – 400 с.
118. Дворкин Л. И. Основы бетоноведения / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – С-П.: ООО «Стройбетон», 2006. – 691 с.
119. Перспективы использования ПГПФ в технологии сборного железобетона/ Мчедлов-Петросн О. П., Ушеров-Маршак А. В., Москаленко С. Б. и др.// Бетон и железобетон. – 1986. – №9. – С. 32-33.
120. Перспективы использования ПГПФ в технологии сборного железобетона/ Мчедлов-Петросн О. П., Ушеров-Маршак А. В., Москаленко С. Б. и др.// Бетон и железобетон. – 1986. – №9. – С. 32-33.
121. Mc Bain J.W., Adhesive Research Committee Reports, 1, 2, 3 (H.M. Stationery Office, London, 1922, 1926, 1932).
122. De Bruyne N.A., Aircraft Eng., 16, 115 (1944), 18, 1 (1947).
123. Mc Laren A.D., Seiler C.J., J. Polymer Sci., 4, 63 (1949).
124. Mc Laren A.D., Symposium “ Adhesion and Adhesives”, John Wiley and Sons, 1954, p.57
125. Москвин Н.И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания / Н.И. Москвин. – Изд. «Лесная промышленность», 1964.
126. Карданов А.В. Синтетические клеи / А.В. Карданов. – М.: Химия, 1968. – 584 с.

127. О механизме влияния тонкомолотых добавок на свойства цементного камня / Ф. Д. Овчинников, В. И. Соломатов, В. М. Казанский и др. // Докл. АН СССР. – Т. 284. – №2. – 1985. – С. 318–403.
128. Robert R. Reinforced Masonry Design / Robert R., Schneider W., Dickey L.-New Jersey, Ed. Prentice-Hall, 1987 – 682 p.
129. Сычев М.М. Неорганические клеи / М.М. Сычев – Л.: Химия, 1974.- 156 с.
130. Баженов Ю. М. Бетанополимеры / Баженов Ю. М. – М.: Стройиздат, 1983. – 472 с.
131. Урьев Н. В. Коллоидно-цементные растворы / Урьев Н. В., Дубинин И. С. – Л.: Стройиздат, 1980. – 192 с.
132. Ohama Y. Development of concrete - polymer materials in Japan / Ohama Y. // Proceedings of the Second international congress on polymers in concrete. – Austin. – 1978 – p 128 – 135.
133. Перспективы использования ПГПФ в технологии сборного железобетона/ Мчедлов-Петросн О. П., Ушеров-Маршак А. В., Москаленко С. Б. и др.// Бетон и железобетон. – 1986. – №9. – С. 32-33.
134. Баженов Ю.М. Высокопрочный мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций / Баженов Ю.М.- М.: Стройиздат, 1963. – 183 с.
135. Стольников В. В. Гидротехнический бетон с добавкой топливной золы-уноса / В. В. Стольников, В. В., В. В. Кинд. – М., – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 124 с.
136. Черкинский Ю. С. Гидратационное твердение цемента в присутствии полимеров / Черкинский Ю. С., Слипченко Г. Ф. // Шестой международный конгресс по химии цемента. Т.3. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 305-307.
137. Попова О. С. Коррозионная стойкость бетонов с добавками водорастворимых смол / Попова О. С. // Бетон и железобетон. – 1983. – №8. – С. 17–19.
138. Черкинский Ю. С. Гидратационное твердение цемента в присутствии полимеров / Черкинский Ю. С., Слипченко Г. Ф. // Шестой международный конгресс по химии цемента. Т.3. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 305-307.

139. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высш. школа, 1980. – 472 с.
140. Петров Б.А., Сидяков П.В. Обеспыливание технологических газов цементного производства. Л. – М.: Стройиздат – 1965. – 90 с.
141. Коленова К.Г. Изучение состава и свойств пыли, уловленной электрофильтрами вращающихся печей и пути ее использования. Автореф. дисс. канд. наук. М.: - 1692 – 25с.
142. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности – Ростов-на-Дону: Феникс – 2007 – 369 с.
143. Гус С., Кейль Ф. Поведение щелочей при обжиге цемента. Сб. Цемент. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1962, с. 37-69.
144. Справочник по производству цемента. Под ред. И.И. Холина. – М.: Стройиздат – 1963 – 851с.
145. Банит Ф.Г., Малыгин А.Д. Пылеулавливание и газоочистка в промышленности строительных материалов. – М.: Стройиздат – 1979 – 351с.
146. Справочник по химии цемента. Под ред. Б.В. Волженского и Л.Г. Судакаса. А.: Стройиздат – 1980 – 224с.
147. Хеннинг О., Штилер Р. Использование высокощелочной цементной пыли в портландцементе// Труды 6-го Международного конгресса по химии цемента. Г.2. М.: Стройиздат, 1974 – с.27-30.
148. Болдырев А.С. Использование отходов и вторичных ресурсов в промышленности строительных материалов// Строительные материалы – 1989. – №7 с.5-7.
149. Сыркин Я.М., Гольдшмидт Э.М. Силикатные материалы на основе пыли, улавливаемой из отходящих газов вращающихся печей// Строительные материалы. – 1961, №2, с.17-19.
150. Куатбаев К.К. Силикатные бетоны из побочных продуктов промышленности. – М.: Стройиздат, 1981. – 246 с.
151. Сулейменов А.Т. Вяжущие материалы из побочных продуктов промышленности. – М.: Стройиздат, 1986. – 189 с.

152. Терновая Е.А. Использование пыли вращающихся печей цементных заводов// Строительные материалы, изделия и санитарная техника. 1987 – №10. – с. 22-23.

153. Спесивцев Ю.А. Изготовление местного вяжущего на основе пыли электрофильтров вращающихся печей// Строительные материалы. 1963 – с.18-19.

154. Баталин Б.С. Местное вяжущее на основе пыли электрофильтров Ново-Пашийского цементного завода. Сб. Вяжущие материалы Сибири и Дальнего востока. Новосибирск. – «Наука» – 1970. – с. 283-287.

155. Алехин Ю.А., Люсов А.М. Экономическая эффективность использования вторичных ресурсов в производстве строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1988. – 344 с.

156. Македон Н.Л., Кругляк С.А., Сидоченко И.М., Завгородний Н.С. Вяжущее на основе шлака и пыли, уловленной запечными электрофильтрами// Цемент. 1969 - №4 – с.7-8.

157. Македон Н.Л. Пылешлаковый цемент – шлакощелочное вяжущее из промышленных отходов// Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции. Тез. докл. Киев, 1979 – с.54.

158. Глуховский В.Д., Македон Н.Л. Грунтоцементы, содержащие пыль-унос клинкерообжигательных печей// Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции. Тез. докл. Киев, 1989 – с.35-36.

159. Волженский А.В. Минеральные вяжущие материалы. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.

160. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. – К.: Будівельник, 1978 – 174 с.

161. Методические рекомендации по проектированию дорожных одежд с основаниями из материалов, укрепленными неорганическими вяжущими. М.: СоюздорНИИ, 1985 – 25 с.

162. Методические рекомендации по применению низкомарочных каменных материалов и загрязненных песков, обработанных неорганическими вяжущими. – М.: СоюздорНИИ, 1990 – 31 с.

163. Теория цемента/ Под ред. А.А.Пашенко. – К.: Будивельник, 1991. – 168 с.
164. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Житковський В.В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне: НУВГП, 2011 - 174 с.
165. Баженов Ю.М., Горчаков Г.И., Алимов Л.И., Воронин В.В. Получение бетона с заданными свойствами. - М.: Стройиздат, 1978 - 54 с.
166. Саницький М.А., Соболь Х.С., Позняк О.Т., Мазурак О.Т. Малоенергомісткі композиційні цементы// Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка» - 2001 - №426 с. 37-40.
167. Powers T.C., Brownyard T.L. Studies and physical properties of hardened Portland cement paste. – Proc. Amer. Concrete Inst., 1947, №43.
168. Дворкин Л.И. Оптимальное проектирование составов бетона. – Львов: Вища шк., 1981. – с.160.
169. Taylor H.F. Cement Chemistry. - London: Academic Press, 1990. – 360 p.
170. Kurdowski W. Chemia cementu. – Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1991, 200 p.
171. Orhard D.F. Concrete Technology. – London, 1979. – Vol 1,2 – 1033 p.
172. Буров Ю.С., Колокольников В.С. Лабораторный практикум по курсу "Минеральные вяжущие вещества". М.: Стройиздат, 1974, – 172 с.
173. Гирштель Г.В., Гладкова С.В., Орбелин С.И. и др. Свойства бетонов на тонкомолотых многокомпонентных вяжущих. // Бетон и железобетон - 1994 - №6 - С.5-7.
174. Естемесов З.А., Урлибаев Ж.С. Свойства бетонов на основе тонкомолотых многокомпонентных вяжущих. // Бетон и железобетон. - 1991 - №1 - С.9-10.
175. Colleparidi M., Corradi M., Valente M. Influence of polymerisation of sulfonated naphthalene condensate of the interaction with cement - Developments in the use of superplasticizers, ACI, 1981 - P. 485-498.

176. Costa U., Massazza F., Barrila A. Adsorption of superplasticizers on C3S, changes in zeta potential and rheology of pastes. // *Cemento*. - 1982 - V.79 - №4 - P.323-336.
177. Massazza F., Costa U., Barrila A. Adsorption of Superplasticizers, SP - 68 - *ACI* - 1981 - P. 499-514.
178. Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон. - М.: Стройиздат, 1981 - 464 с.
179. Грушко И.М., Ильин А.Г., Чихладзе Э.Д. Повышение прочности и выносливости бетона. - Харьков: Вища школа, 1986 - 149 с.
180. Сейтжанов С. С. Тонкокомлотые многокомпонентные вяжущие и бетоны. / С. С. Сейтжанов, З. А. Естемесов // Алматы : НИИСтрой. 1997. – 230 с.
181. Алехин Ю. А. Экономическая эффективность использования вторичных ресурсов в производстве строительных материалов / Ю. А. Алехин, А. М. Люсов // – М. : Стройиздат, 1988. – 344 с.
182. Грушко И. М. Влияние комплексных добавок на прочность бетона И. М. Грушко, Э. В. Дегтярева // *Строительные материалы и конструкции*. – 1985. – С. 107–113.
183. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии.– Москва: Химия, 1975. – 512 с.
184. Пинус Е. Р. Контактные слои цементного камня в бетоне и их значение // *Структура, прочность и деформации бетона*. – М. : Стройиздат. – 1966. – С. 290–294.
185. Любимова Т. Ю. Влияние кварцевого заполнителя на кинетику твердения минеральных вяжущих веществ / Т. Ю. Любимова, Н. В. Михайлов, П. А. Ребиндер // *Докл. АН СССР*. – Т. 162. – №1. – 1968. – С. 144–147.
186. Иванов Ф. М. Структура и свойства цементных растворов / *Физико-химическая механика дисперсных структур*. – М. : Наука. – 1966. – С. 339–346.
187. Гольденберг Л. Б. применение зол ТЭС для улучшения свойств мелкозернистых бетонов / Л. Б. Гольденберг, С. Л. Оганесянц // *Бетон и железобетон*. – 1987. – №1. – С. 15 – 17.

188. Дворкін Л.Й., Бордюженко О.М., Житковський В.В., Кочкар'юв Д.В., Марчук В.В. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі. Рівне: НУВГП, 2020 – 305 с.
189. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту /Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Житковський В.В. - Рівне: НУВГП, 2011. – 174 с.
190. Голунов С.А. Модификация плиточных клеев редисперсионными полимерными порошками VINNAPAS // Строительные материалы. – 2004, №3.
191. Дворкин Л.Й. В'язучі речовини / Л.Й. Дворкін, Р.Ф. Рунова, О.Л. Дворкін, Ю.Д. Носовский // Київ, «Основа»,2012. – 448 с.
192. Дворкін Л.Й. Випробування бетонів і розчинів. Проектування їх складів. / Л.Й. Дворкін, В.І. Гоц, О.Л. Дворкін // Навчальний посібник. – 2014. – 397 с.
193. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства. / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін // - К.: Основа, 2007. - 616 с.
194. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону. / В.В. Стольников // - М., - Госэнергоиздат, 1962.- 330 с.
195. Стольников В.В., Литвинов Р.Е. Трещиностойкость бетона. / В.В. Стольников, Р.Е. Литвинов // - М.: Энергия, 1972.- 113.
196. Сергеев А. М. Полимерные композиции для наливных полов / А.М.Сергеев // Строительные материалы. – 2000. – №3. – С 18-19.
197. Попов К. Н. Самовыравнивающиеся безусадочные полимерцементные композиции для покрытия полов / К. Н. Попов, М. Б. Каддо // Строительные материалы. – 2000. –№3. – С 42-43.
198. Дворкін Л.Й Модифіковані литі бетони для самонівельованих підлог / Л.Й. Дворкін, О.Л., Дворкін, І.М Риженко // Ж. Строительные материалы и изделия №1,2014, с.10...12.