МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)

на тему**: «**Дослідження будівельних розчинів високої адгезійної міцності та тріщиностійкості **»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1923-пцб-2
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
освітньої програми «Промислове і цивільне будівництво»
Міщенко А.В.
Керівник доц., к.т.н. Самченко Р.В.
Рецензент с.н.с., к.т.н. Шокарєв Є.О.

Запоріжжя
2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра Промислового та цивільного будівництва
Рівень вищої освіти другий магістерський рівень
Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(шифр та назва)
Освітньо-професійна програма «Промислове і цивільне будівництво»
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ПЦБ
проф. Арутюнян І.А.
«____» _____ 20____ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Міщенко Артем Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Дослідження будівельних розчинів високої адгезійної міцності та тріщиностійкості

Керівник роботи Самченко Роман Васильович, к.т.н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «**30**»**вересня**2024 року №**1486-с**
2 Строк подання студентом роботи 27.11.2024 р.
3 Вихідні дані до роботи *Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливості розвинення проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об'єкт досліджень, предмет досліджень*
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Дослідити теоретичну основу ефективності використання комплексу полідисперсних кремнеземовмісних наповнювачів різного походження. Виявити закономірності впливу полідисперсних кремнеземовмісних наповнювачів. оптимізувати склад поліфункціональних модифікаторів для покращення властивостей цементно-піщаних розчинів.*

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *Від восьми графічних аркушів із результатами аналітичних обґрунтувань наукового напряму досліджень, результатами експериментальних досліджень, доказами оптимальності запропонованих методик, результатами чисельних розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних методів досліджень*

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Самченко Р.В., доц.		
Розділ 2	Самченко Р.В., доц.		
Розділ 3	Самченко Р.В., доц.		
Розділ 4	Самченко Р.В., доц.		

7 Дата видачі завдання 04.03.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1 Досвід та перспективи використання дрібнозернистого бетону	27 вересня	
2	Розділ 2 Вихідні матеріали, методи та методики, застосовувані в дослідженнях	25 жовтня	
3	Розділ 3 Вплив наповнювачів і пластифікаторів на структурно-реологічні характеристики розчинових сумішей	11 листопада	
4	Розділ 4 Оптимізація складу сумішей для модифікованих розчинів з різними функціональними властивостями	22 листопада	

Студент _____ А.В. Міщенко
(підпис) *(ініціали та прізвище)*

Керівник роботи _____ Р.В. Самченко
(підпис) *(ініціали та прізвище)*

Нормоконтроль пройдено _____ Н.О. Данкевич
(підпис) *(ініціали та прізвище)*

АНОТАЦІЯ

Міщенко А.В. Дослідження будівельних розчинів високої адгезійної міцності та тріщиностійкості.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник Р.В. Самченко. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2024.

Теоретично доведено можливість покращення якості цементних розчинів, які застосовуються для улаштування підлогових елементів та відновлення пошкоджених ділянок розчинових поверхонь. Проаналізовано вплив комплексу полідисперсних кремнеземовмісних наповнювачів різного генезису та структури і суперпластифікатора С-3 на структурно-реологічні властивості активованих та неактивованих модифікованих сумішей. Оптимізовано склади поліфункціональних модифікаторів, які сприяють покращенню якості цементно-піщаних розчинів різного призначення.

Ключові слова: будівельні розчини, адгезійна міцність, тріщиностійкість, підвищення якісних характеристик, модифікація складу, оптимізація.

Список публікацій магістранта:

Міщенко А.В., Самченко Р.В. Дослідження будівельних розчинів високої адгезійної міцності та тріщиностійкості. Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Perspectives of contemporary science: theory and practice» (14-16 листопада 2024 р., м. Львів). Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2024. С. 435-437.

ABSTRAKT

Mishchenko A.V. Research of building mortars with high adhesive strength and crack resistance.

Qualification final work for obtaining a higher education degree of master in specialty 192 – Construction and civil engineering, scientific supervisor R.V. Samchenko. Zaporizhia National University. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia, Department of Industrial and Civil Engineering, 2024.

The possibility of improving the quality of cement mortars used for arranging floor elements and restoring damaged areas of mortar surfaces has been theoretically proven. The influence of a complex of polydisperse silica-containing fillers of various genesis and structure and superplasticizer C-3 on the structural and rheological properties of activated and non-activated modified mixtures has been analyzed. The compositions of multifunctional modifiers that contribute to improving the quality of cement-sand mortars for various purposes have been optimized.

Keywords: mortars, adhesive strength, crack resistance, improvement of quality characteristics, composition modification, optimization.

List of publications of the master's student:

Mishchenko A.V., Samchenko R.V. Research of mortars of high adhesive strength and crack resistance. Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "Perspectives of contemporary science: theory and practice" (November 14-16, 2024, Lviv). Lviv: National University "Lviv Polytechnic", 2024. P. 435-437.

ЗМІСТ:

ВСТУП 8

1 ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНУ 11

1.1 Визначення термінів по науковій тематиці і сфера їх застосування в будівництві 11
1.2 Особливості вибору складу та матеріалів для дрібнозернистих бетонів і розчинів 15
1.3 Вплив тонкомелених добавок і заповнювачів на процеси формування структури дрібнозернистого бетону або розчину 20

2 ВИХІДНІ МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ, ЗАСТОСОВУВАНІ В ДОСЛІДЖЕННЯХ 28

2.1 Схема дослідження 28
2.2 Матеріали, що використовувались у дослідженнях 29
2.3 Математичне планування експерименту 36
2.4 Оцінка впливу активації на формування структури та властивостей розчинових сумішей і розчинів 40

3 ВПЛИВ НАПОВНЮВАЧІВ І ПЛАСТИФІКАТОРІВ НА СТРУКТУРНО-РЕОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗЧИНОВИХ СУМІШЕЙ 42

3.1 Аналіз змін реологічних властивостей модифікованих сумішей за впливу наповнювачів і пластифікаторів 42
3.2 Вплив наповнювачів і пластифікаторів на текучість розчинових

сумішей 48
3.3 Вплив наповнювачів і добавок на розчиновідділення 52
3.4 Вплив наповнювачів і пластифікуючих добавок на розшаровуваність розчинових сумішей 53
3.5 Вплив наповнювачів і пластифікуючих добавок на час життєздатності розчинових сумішей 56
3.6 Порівняльний аналіз впливу виду наповнювача на структурно- реологічні властивості розчинових сумішей 59

4 ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ СУМІШЕЙ ДЛЯ МОДИФІКОВАНИХ РОЗЧИНІВ З РІЗНИМИ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ 61

4.1 Етапи багатокритерійної оптимізації складів і властивостей 61
4.2 Оцінка взаємозамінності пластифікаторів 63
4.3 Технологічний процес використання модифікованих сумішей для розчинів різних видів застосування 72

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 78

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність теми "Дослідження будівельних розчинів високої адгезійної міцності та тріщиностійкості" зумовлена зростаючими вимогами до якості будівельних матеріалів, особливо в умовах сучасного будівництва, де важливим фактором є забезпечення довговічності та надійності конструкцій. Сучасні будівельні об'єкти потребують розчинів, що здатні забезпечити високі показники зчеплення з різними поверхнями, а також витримувати вплив різноманітних зовнішніх факторів, таких як волога, температурні коливання та механічні навантаження. Висока адгезійна міцність дозволяє забезпечити стійкість конструкцій до відшарування та зниження міцності, а тріщиностійкість критична для збереження цілісності матеріалу під час експлуатації.

Дослідження таких розчинів сприяє удосконаленню технологій їх виготовлення, що в свою чергу дозволяє досягти значного підвищення якості та довговічності будівельних конструкцій, а також знижує витрати на обслуговування та ремонти в майбутньому. Оскільки вимоги до будівельних матеріалів постійно зростають, актуальність теми залишається високою, оскільки на ринку необхідні інноваційні рішення, що поєднують ефективність, економічність та екологічність.

Під час вибору складу багатокомпонентних сумішей важливим є, по-перше, детальне вивчення умов їхнього приготування, а по-друге, аналіз сумісності складників та взаємного посилення їх дії в багатокомпонентних сумішах. Одним із ключових технологічних аспектів є визначення оптимальної послідовності введення компонентів до складу суміші. При використанні полідисперсних наповнювачів слід також враховувати процеси змішування, які залежать від розвиненої поверхні частинок твердої фази.

Важливим і актуальним є створення модифікованих розчинів із підвищеною адгезійною міцністю та тріщиностійкістю, що призначені для облаштування елементів підлог або відновлення пошкоджених ділянок

розчинових поверхонь. При цьому важливим залишається використання екологічно безпечного комплексу компонентів.

Метою магістерської роботи є підвищення якісних характеристик цементних розчинів для різних цілей, зокрема адгезійної міцності та стійкості до утворення тріщин, шляхом модифікації складу сумішей.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні **завдання**:

- дослідити теоретичну основу ефективності використання комплексу полідисперсних кремнеземовмісних наповнювачів різного походження і структури у поєднанні з суперпластифікаторами для підвищення якісних характеристик модифікованих сумішей і цементних розчинів для різних цілей.

- виявити закономірності впливу полідисперсних кремнеземовмісних наповнювачів різного походження і структури в комбінації зі суперпластифікаторами на реологічні властивості модифікованих сумішей, враховуючи способи їх приготування.

- оптимізувати склад поліфункціональних модифікаторів для покращення властивостей цементно-піщаних розчинів, спираючись на використання комплексу полідисперсних кремнеземовмісних наповнювачів різного походження і структури разом із суперпластифікаторами.

Об’єкт дослідження — модифіковані цементні розчини, призначені для створення елементів підлог та відновлення пошкоджених ділянок розчинових покриттів.

Предмет дослідження — закономірності впливу наповнювачів на структурно-реологічні характеристики сумішей, а також фізико-механічні та будівельно-експлуатаційні властивості модифікованих розчинів, отриманих на їх основі.

Методи досліджень Комплексні дослідження охоплювали натурні експерименти, що базувалися на плануванні багатофакторного експерименту для розробки ЕС-моделей. У ході роботи здійснювалося визначення структурно-реологічних, фізико-механічних та будівельно-експлуатаційних властивостей за стандартними методиками, а також аналіз характеристик

структури. Побудова та аналіз ЕС-моделей виконувались із використанням діалогової системи COMPEX, спеціально створених планів досліджень, а також стандартних програмних засобів Microsoft Office та CorelDraw.

Наукова новизна роботи полягає у оптимізації складів поліфункціональних модифікаторів для покращення якості цементно-піщаних розчинів, що базуються на комплексі полідисперсних кремнеземовмістких наповнювачів різного походження та структури, а також суперпластифікаторів.

Апробація роботи. Основні положення роботи опубліковані на IX Міжнародній науково-практичній конференції «Perspectives of contemporary science: theory and practice» у секції «Технічні науки» (2024, м. Львів).

Структура роботи. Структурно робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків. Загальний обсяг 79 сторінок. Включає 36 рисунків, 22 таблиці, список використаних джерел з 17 пунктів.

1 ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНУ

1.1 Визначення термінів по науковій тематиці і сфера їх застосування в будівництві

Дрібнозернистий бетон (ДЗБ) — це бетон або розчин, що містить заповнювачі з максимальною крупністю 10 мм та менше. Як правило, основним заповнювачем є пісок фракцією 5 мм та менше або частки з модулем крупності $M_{кр}$ = 2,51,25, які відомі як піщані бетони чи розчини.

Властивості дрібнозернистого бетону зумовлені його структурою, яка, в свою чергу, значною мірою залежить від структури цементного каменю. Сьогодні багатокомпонентні дрібнозернисті бетони та розчини знаходять широке застосування в різних сферах будівництва. Раніше їх використання було обмежене через певні властивості та структуру, проте завдяки впровадженню спеціальних модифікаторів вдалося значно покращити їх експлуатаційні характеристики.

Завдяки переходу до багатокомпонентних сумішей з різними добавками, такими як суперпластифікатори та тонкодисперсні мінеральні добавки, вдалося досягти значного покращення властивостей. Багатокомпонентна структура має ряд переваг. По-перше, вона дозволяє ефективно управляти структуроутворенням на різних етапах технологічного процесу. По-друге, така структура дає можливість отримувати матеріали з заданими властивостями, що забезпечує їх адаптацію до різноманітних умов експлуатації.

Серед основних переваг дрібнозернистої структури можна виокремити такі:

- Отримання однорідної тонкодисперсної структури бетону без великих включень, що мають інше походження;

- Покращена здатність сумішей до трансформації та тіксотропії;

- Широкий спектр застосування, включаючи формування виробів різними методами: ливарним, екструзійним, торкретуванням, штампуванням, пресуванням та іншими;

- Поліпшена транспортування та можливість використання сухих сумішей з гарантованою постійністю складу і властивостей;

- Отримання спеціальних бетонів, таких як гідроізоляційний, фібробетон, армоцемент, електропровідний бетон, декоративний бетон і інші;

- Можливість розробки нових архітектурно-конструктивних рішень, таких як тонкостінні та шаруваті конструкції, вироби змінної щільності, гібридні конструкції;

- Багатофункціональність матеріалу, що дозволяє за допомогою коригування дозувань та зміни компонентів отримати різні типи бетону, такі як конструкційний, гідроізоляційний, теплоізоляційний, декоративний;

- Можливість широкого використання місцевих матеріалів та зниження собівартості порівняно з бетоном на великих заповнювачах.

Дрібнозернистий бетон також має важливі характеристики, серед яких підвищена морозостійкість, водонепроникність, міцність на розтяг при вигині, а також оптимальні показники питомої поверхні твердої фази та пористості цементного каменю.

Сьогодні значний внесок [1] у розвиток модифікації розчинів та бетонних сумішей зробили такі вчені, як М.А. Саницький, Т.А. Костюк і В.П. Сопов. Дрібнозернисті бетони та розчини, завдяки своїй однорідній структурі, легше піддаються різним технологічним процесам, що дозволяє отримувати різноманітні конструкції. Для створення спеціальних дрібнозернистих бетонів у складі використовують рідке скло, полімери, фосфатні сполучні, а також глиноземисті і високоліноземисті цементи.

Дрібнозернистий бетон (ДЗБ) має свою специфічну область застосування, і в останні роки спостерігається тенденція до розширення цієї сфери. Традиційно ці бетони використовуються в регіонах, де відсутній

великий заповнювач. Як основний заповнювач найчастіше використовують природний кварцовий пісок, хоча також існують розробки та досвід застосування інших дрібнозернистих заповнювачів, таких як шлаки з щільною та пористою структурою, керамзитовий і перлітовий пісок, бій скла та порцеляни, піритові огірки, відходи мокрої магнітної сепарації залізистих кварцитів, вермикуліт, пінополістирол, мелене цегельне бите, а також відходи деревної промисловості.

Силікатний або вапняно-піщаний ДЗБ з щільністю 1700-2400 кг/м³, міцністю на стиск 20-70 МПа та морозостійкістю до 200 циклів використовуються для виготовлення різних збірних бетонних та залізобетонних конструкцій, як звичайних, так і попередньо-напружених.

Для отримання виробів з дрібнозернистого бетону з комірчастою структурою в цементно-піщану або силікатну суміш вводять пороутворюючі добавки, що дозволяє отримувати дрібнозернистий піно- та газобетон. Перший патент на цей винахід був зареєстрований ще в 1890 році, а застосування таких бетонів у будівництві почалося в 20-х роках XX століття. Сьогодні набуває популярності безавтоклавний спосіб виробництва пористих бетонів, що дозволяє значно зменшити час на тужавлення і тверднення матеріалів завдяки застосуванню різноманітних органічних та мінеральних добавок.

Дрібнозернистий пінобетон широко застосовується для різноманітних цілей, зокрема для зовнішньої теплоізоляції бетонних та металевих каркасних будівель. У своїх роботах Ю.М. Баженов описав важливі моменти виготовлення армоцементних конструкцій, які є тонкостінними і армуються сітками.

Для покрівельних покриттів можна використовувати композиції дрібнозернистих бетонів із добавкою промислових відходів. Зокрема, С.І. Павленко в своїх дослідженнях розробив склади бетону, що включають цемент, шлаковий пісок, гідровидалення золи та спеціальні добавки. Одержаний дрібнозернистий бетон має водонепроникність W12 і

морозостійкість від 1100 до 1300 циклів, що дозволяє уникати використання додаткових захисних покриттів.

Дрібнозернистий бетон також має широке застосування в облаштуванні дорожніх і аеродромних покриттів, що свідчить про його універсальність і ефективність у різних умовах.

Особливим різновидом дрібнозернистих бетонів є будівельні розчини для кладки. Завдяки вдосконаленню технологій їх виробництва та впровадженню нових розробок, асортимент сухих будівельних сумішей для кладки кам'яних конструкцій значно розширився. Ці суміші дозволяють здійснювати кладку як в літній, так і в зимовий період при низьких температурах. Розроблені різноманітні склади для обробки поверхонь як всередині, так і зовні будівель, включаючи фасади, цокольні частини, а також для штукатурення гладких і шорстких стін, виготовлених із різних матеріалів, зокрема пористого бетону. Для теплоізоляційних робіт пропонуються штукатурні суміші на основі перлітового піску з середньою щільністю від 400 до 600 кг/м³. Також створені спеціальні суміші для укладання плит з натурального каменю, які мають короткий час тужавлення. До окремої групи відносяться герметизуючі склади з водонепроникністю більше W10, що використовуються для забезпечення герметичності конструкцій. Для систем теплоізоляції будівель та споруд активно застосовуються різноманітні штукатурні та клейові склади.

Розширення використання тонкостінних і густоармованих конструкцій вимагає зменшення крупності заповнювачів, що, в свою чергу, збільшує можливості застосування дрібнозернистих бетонів та розчинів. Ефективність таких матеріалів особливо зростає, коли їх склад базується не тільки на міцності на стиснення, а й на властивостях, таких як висока міцність на розтягування при згині. Це поєднання властивостей є важливим вимогам до дорожнього бетону, що сприяє широкому застосуванню дрібнозернистих бетонів у дорожньому будівництві.

Для зведення тонкостінних конструкцій або в спеціальних роботах, таких як замонолічування стиків збірних споруд чи нанесення гідроізоляційних покриттів, доцільно використовувати дрібнозернисті піщані бетони та розчини. Враховуючи особливості таких бетонів, для їх укладання та ущільнення слід застосовувати спеціальні методи, що сприяють покращенню фізико-механічних властивостей матеріалу.

1.2 Особливості вибору складу та матеріалів для дрібнозернистих бетонів і розчинів

Під час створення дрібнозернистого бетону (ДЗБ) можна досягти міцності, що відповідає показникам звичайного важкого бетону, але з вищою міцністю на розтяг під час вигину. Для ДЗБ це співвідношення становить 1/4...1/6, тоді як для бетону з крупним заповнювачем воно складає лише 1/6...1/8. Однак у складі ДЗБ використовується на 20-40% більше цементу порівняно зі звичайним бетоном тієї ж міцності. Це зумовлено значною пустотністю дрібного заповнювача. Наприклад, пустотність кварцового піску із модулем крупності 1,8 становить 45-48%, тоді як у суміші з гранітним щебенем фракції 5-20 мм цей показник знижується до 32-35%. Крім того, дрібний заповнювач має більшу питому поверхню, що підвищує водопотребу суміші.

Для виробництва ДЗБ застосовують портландцемент марки не нижче 500. Витрата цементу залежить від його марки, необхідної рухливості суміші, водоцементного відношення (В/Ц), методу приготування та способу використання. Зазвичай на 1 м³ суміші потрібно 500-800 кг цементу. Надмірна витрата цементу (понад 800 кг/м³) економічно необґрунтована і технологічно неефективна, оскільки збільшує усадкові деформації та знижує довговічність

бетону. Оптимальним є вміст цементу в межах 600-700 кг/м³, що відповідає складу приблизно 1:1,75.

При В/Ц = 0,3 спостерігається пряма залежність між витратою цементу та міцністю бетону: зменшення вмісту цементу призводить до зниження міцності через гірше ущільнення та зменшення щільності. Якщо В/Ц перевищує 0,4, максимальна міцність досягається за оптимального співвідношення між цементом і піском, яке забезпечує найбільшу щільність суміші. Для кожного складу бетону існує оптимальне значення В/Ц, що забезпечує найкращі характеристики міцності. У разі низьких В/Ц та належного ущільнення можна створити піщані бетони з вищою міцністю, ніж звичайні, проте це вимагає значного перевитрат цементу і підходить лише для спеціальних конструкцій із техніко-економічним обґрунтуванням.

У процесі приготування та ущільнення цементно-піщаних сумішей часто утворюються повітряні бульбашки, що підвищують пористість на 3-6%, знижуючи міцність бетону. Чим вища жорсткість суміші, тим більша кількість повітря залучається. Це явище слід враховувати для забезпечення оптимальних характеристик бетону.

Пісок характеризується підвищеною пустотністю порівняно із сумішшю піску та щебеню. За низького вмісту цементу в "худих" сумішах, таких як 1:3, кількість цементного тіста може виявитися недостатньою для повного покриття зерен піску та заповнення всіх пустот. Це призводить до формування додаткових пір, які підвищують загальну пористість бетону і знижують його міцність. Через це створення міцних піщаних бетонів при обмеженій витраті цементу (200–300 кг/м³) є складним завданням.

У піщаному бетоні використання дрібного піску із підвищеною питомою поверхнею та високою пустотністю потребує збільшення витрати води для забезпечення рухливості суміші, що негативно впливає на її міцність (табл. 1.1).

Якщо в звичайному бетоні заміна крупного піску дрібним знижує міцність приблизно на 10%, то в дрібнозернистому бетоні цей показник

зменшується на 30%. Максимальна міцність піщаних бетонів складу 1:2 або 1:3, яка може бути досягнута при ефективному ущільненні, інколи зменшується у 2–3 рази.

Тому для виготовлення дрібнозернистих бетонів рекомендується застосовувати великий чистий пісок або збагачувати дрібний пісок домішками більших фракцій, таких як відсіви від дроблення каменю чи дрібний гравій.

Таблиця 1.1 – Легкоукладність суміші при різному В/Ц відношенні

Легкоукладність бетонної суміші		Співвідношення між піском та цементом по масі при різному водоцементному відношенні				
ОК, см	*Ж*, см	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
5-9	-	1,6	2,7	3,8	4,9	5,7
1-4	-	1,8	2,9	4,0	5,1	6,0
-	5-10	2,2	3,3	4,4	5,4	6,3
-	11-20	2,7	3,7	4,8	6,0	-

Дрібний заповнювач, пісок, може бути природного або штучного походження. Природний пісок утворюється внаслідок природного руйнування скельних порід, таких як граніт. За мінеральним складом розрізняють кварцові, польовошпатні, карбонатні та інші види пісків. Відповідно до зернового складу, згідно з ДСТУ Б В.2.7-232:2010, пісок поділяється на підвищеної крупності, крупний, середній, дрібний і дуже дрібний. Для виготовлення бетону або розчину зерновий склад піску повинен відповідати вимогам стандарту ДСТУ Б В.2.7-210:2010.

Для бетонів класу В25 і вище рекомендується використовувати крупний пісок із модулем крупності понад 2,5. Піски з модулем крупності 1,25–2 можуть застосовуватися для бетонів класу до В15. Якщо зерновий склад піску не відповідає стандарту, його поділяють на фракції за допомогою сит із розміром отворів 1,25 або 0,63 мм, після чого фракції змішуються у встановлених лабораторією пропорціях.

Використання дрібного піску з великою питомою поверхнею збільшує витрату цементу, тому такі піски доцільно застосовувати лише як дрібну фракцію у фракціонованих сумішах. Їх використання для виготовлення бетону доцільне лише за наявності відповідного економічного обґрунтування, обов’язково із додаванням пластифікуючих чи повітрозалучаючих добавок.

Для сумішей, що транспортуються бетононасосами, рекомендується підвищувати вміст дрібних частинок у піску. Ці частинки разом із цементом створюють пластичну масу, яка утворює змазуючий шар під час перекачування. Це зменшує опір суміші та скорочує витрати електроенергії. У таких випадках загальний вміст частинок розміром менше 0,315 мм у піску має становити 15–20%, із них частки розміром 0,06–0,16 мм — 3–7%. За нестачі дрібних фракцій у природному піску до складу вводяться мінеральні добавки, але їх вміст не повинен перевищувати 20%.

Кількість глинистих, мулистих і пилоподібних частинок у піску повинна бути обмеженою. Глина й мул, обволікаючи зерна піску, заважають їх зв’язуванню з цементним каменем. Для гідротехнічного бетону та конструкцій, що контактують із сірчанокислими розчинами, вміст цих частинок не має перевищувати 1%, а слюди — 3%. Небажані й органічні домішки, які можуть уповільнювати твердіння цементу та знижувати його міцність.

В’яжуче речовина, портландцемент М500, є ключовим компонентом для створення цементних сумішей. Портландцемент поділяється на три основні різновиди: Д0 (без добавок), Д5 (до 5% активних мінеральних добавок) і Д20 (з вмістом добавок понад 5%, але не більше 20%). Для останнього типу дозволено використовувати до 10% добавок осадового походження або до 20% доменних і електротермофосфорних шлаків.

Для будівельних розчинів, які застосовуються у кладці, облицюванні чи штукатурних роботах, часто використовують «розведений портландцемент». Його характеристики включають строки початку тужавіння не раніше 45 хвилин і завершення не пізніше 12 годин. Водночас цемент повинен демонструвати водоутримуючу здатність, при якій водовідділення цементного

тіста за В/Ц = 1 не перевищує 30% за обсягом. Міцність стандартних зразків цементно-піщаного розчину після 28 діб твердження повинна бути не нижчою за 19,6 МПа.

Виробництво якісних дрібнозернистих бетонів та розчинів неможливе без застосування водоредукуючих пластифікаторів. Суперпластифікатори взаємодіють із цементом і його гідратаційними продуктами, покращуючи реологічні характеристики цементних паст. Їхня ефективність зростає через кілька хвилин після замішування, коли вони взаємодіють із силікатними фазами цементу, знижуючи в'язкість системи.

Для підвищення морозостійкості та довговічності бетонів і розчинів вводяться повітрозалучаючі добавки. Ці речовини покращують легкість укладання суміші, запобігають її розшаруванню та зменшують водовідділення. Введення таких добавок дозволяє експлуатувати бетони за умов багаторазового заморожування та відтаювання без ризику серйозного руйнування структури.

Мінеральні добавки, як і наповнювачі, мають високу дисперсність і впливають на особливості цементних систем. Хоча терміни «мінеральна добавка» і «наповнювач» є умовними, вони широко використовуються для позначення компонентів, які покращують характеристики цементних сумішей.

Другою найважливішою властивістю активних мінеральних добавок є їх водопотреба, яка визначається необхідною кількістю води у відсотках від маси цементу для отримання тіста нормальної гущини. Велику водопотребу мають пухкі високодисперсні породи, наприклад, трепел.

Гідравлічно активні добавки суттєво впливають на процеси формування структури цементних систем завдяки їхній взаємодії з гідроксидом кальцію. Серед таких добавок найбільш поширеним є ультрадисперсний мікрокремнезем (МК), що є побічним продуктом виробництва кремнійвмісних сплавів. Його сферичні частинки, розміром 0,01–0,1 мкм, містять до 95% аморфного кремнезему, який активно вступає в реакцію з гідроксидом кальцію, утворюючи малорозчинні низькоосновні гідросилікати кальцію.

Унікальність мікрокремнезему пояснюється високою питомою поверхнею його частинок.

Особливе значення серед модифікаторів мають матеріали фуллероїдної структури, що характеризуються розмірами частинок від кількох десятків до сотень нанометрів. Підвищені вимоги до якості будівельних матеріалів у сучасному будівництві та реконструкції стимулюють пошук способів покращення їх фізико-механічних властивостей і довговічності.

Для підвищення міцності та пластичності бетонів і розчинів застосовується дисперсне армування волокнами (фіброю), такими як сталеві, базальтові, синтетичні та вуглецеві. Це дозволяє зменшити крихкість бетону та значно підвищити його пластичність. Розподіл фібр може бути випадковим або організованим, наприклад, шляхом введення тканих сіток. Досліди показують, що армоцемент має високу тріщиностійкість, ударну міцність і деформативність. Ефективним є зовнішнє посилення конструкцій композитами на основі вуглеволокна, що забезпечує додаткове зміцнення.

Застосування фуллероїдних наноініціаторів у поєднанні з базальтовою мікрофіброю є особливо перспективним. Мікрофібра, окрім зручності в технології перемішування, зберігає свої переваги. Однак ефективність армуючих волокон залежить від їхнього модуля пружності. Для значного підвищення міцності бетону волокна повинні перевищувати модуль пружності цементної матриці, яка має значення 15–30 ГПа. Волокна з нижчим модулем пружності підходять для поліпшення ударостійкості, тріщиностійкості, міцності на розтяг і твердості поверхні.

1.3 Вплив тонкомелених добавок і заповнювачів на процеси формування структури дрібнозернистого бетону або розчину

Щороку зростає інтерес до застосування тонкомелених компонентів і

добавок у виробництві в’яжучих і бетонів. Основна увага приділяється дослідженню механізмів впливу добавок на гідратацію та структуроутворення цементного каменю. Розуміння фізико-хімічних процесів відкриває можливості для їх регулювання, що дозволяє створювати матеріали із заданими фізико-механічними властивостями та експлуатаційними характеристиками.

Дослідження під керівництвом Тімашова В.В. показали вплив різних добавок на гідратацію портландцементу. Об’єктами вивчення стали мінерали портландцементного клінкеру, кварцевий пісок, аморфна кремнекислота, натрій-кальцій-силікатне скло, кварцове скло, гідрат окису кальцію та гідратований цемент. Результати експериментів свідчать, що часткова заміна цементу на різні добавки суттєво впливає на гідратацію, а отже, і на міцність цементних конгломератів.

Найвищу міцність показали зразки з тонкомеленим кварцевим піском, C2S, C3S, склом і гідратованим цементом. Виявлено, що швидкість формування продуктів гідратації залежить від властивостей поверхонь, на яких відбуваються ці процеси. Чим вища міцність частинок добавки, тим міцніша вся система.

Ефективність мінеральних добавок пов’язують з їх здатністю розширювати простір між зернами цементу, створюючи умови для осідання продуктів гідратації. Важливим фактором є дисперсність добавок: тонкі частинки заповнюють пустоти цементу, сприяючи формуванню щільної структури.

На основі поліструктурної теорії композиційних матеріалів дослідники встановили, що оптимальна дисперсність мінеральної добавки залежить від її поверхневої енергії. Якщо енергія добавки менша за енергію зерен в’яжучого, то розміри частинок добавки повинні співвідноситися із зернами в’яжучого у пропорції від 3 до 10.

Характеристики міцності цементного каменю залежать від дисперсності добавки, що описується експоненційною функцією. Однак при питомій

поверхні понад 500 м²/кг частинки схильні до агрегації, що ускладнює рівномірне змішування.

Згідно з дослідженнями Капрієлова С.С., частинки тонкодисперсних добавок, покриті адсорбційними шарами води, заповнюють проміжки між цементними частинками, створюючи в'язкопластичне середовище з унікальними властивостями. Дослідження також показали, що додавання до 5% таких добавок від маси цементу не впливає значно на в'язкість розчину і не потребує додаткової води. Проте перевищення оптимальної кількості наповнювача може перешкоджати зростанню кристалогідратів і знижувати міцність цементного каменю.

Методом ртутної порометрії було досліджено вплив перліту на мікроструктуру цементного каменю у віці 3, 28 і 60 діб. Перліт із питомою поверхнею 580 м²/кг додавали в цемент у кількості до 40% від маси. Результати показали, що взаємодія перліту з продуктами гідратації зменшує середній розмір пір і зміщує розподіл пор у бік радіуса 3-20 нм, що сприяє підвищенню щільності структури.

Існує також думка, що тонкодисперсні добавки виконують роль центрів кристалізації, прискорюючи початкові етапи гідратації клінкерних мінералів. Дослідження із високодисперсним кварцовим піском показали, що зі збільшенням питомої поверхні та концентрації піску в системі підвищується швидкість виділення $Ca(OH)_2$. Це пояснюється тим, що тонкодисперсні частинки слугують платформою для кристалізації $Ca(OH)_2$ із рідкої фази, забезпечуючи більш швидке і ефективне ущільнення структури цементного каменю.

У роботі наведено результати досліджень процесів гідратації змішаних в'яжучих, до складу яких входять тонкодисперсний кварц і вапняк. Помел мінеральних добавок, як зазначають різні дослідники, суттєво збільшує їх активність у цементних системах. Наприклад, розпорошення золи-винесення до питомої поверхні 400-600 м²/кг сприяє руйнуванню агломератів зольних частинок, відкриваючи активні поверхні глобулітів, що підвищує активність

зол.

Подрібнення доменного гранульованого шлаку, як свідчать дослідження, зменшує ступінь полімеризації його силікатно-алюмінатного каркасу, переводячи частину іонів алюмінію з тетраедричної до октаедричної координації, що посилює гідравлічну активність шлаку. Крім того, помел переводить компоненти шлаку в метастабільний рентгеноаморфний стан, який сприяє утворенню більш активних з’єднань.

Використання ультрадисперсних мінеральних добавок, таких як зола рисового лушпиння, призводить до зростання потреби у воді для забезпечення нормальної консистенції, що пов’язано з утворенням шару адсорбційно-зв’язаної води на частинках. Це підвищує в'язкість системи, але водночас зменшує міжмолекулярну взаємодію твердої фази, ослаблюючи коагуляційні контакти, які стають оборотними. Система з ультрадисперсним матеріалом розріджується під дією вібрації і знову стає в’язкою після її припинення.

Дослідження показують, що введення ультрадисперсних добавок до 5% від маси цементу практично не впливає на в'язкість системи, тому додаткова вода не потрібна. На думку деяких авторів, ці добавки коригують пористість цементного каменю, зменшуючи розміри капілярних пір і роблячи структуру більш однорідною. Це сприяє формуванню більш щільного цементного каменю зі зменшеною капілярною пористістю, як показано на рисунку 1.4.

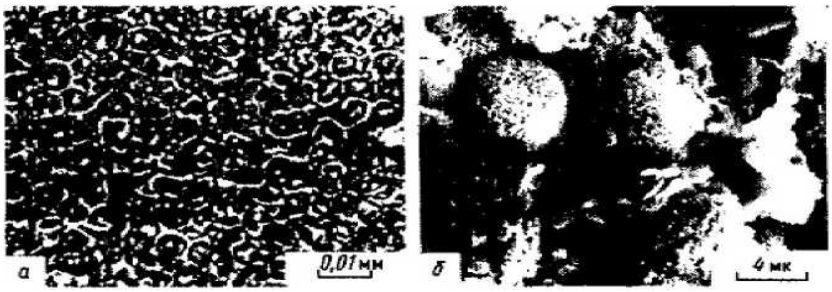


Рисунок 1.4 – Електронні мікрофотографії трепелу

1.4 Сутність процесів активації цементних систем

Активація сумішей передбачає застосування різних фізичних, фізико-хімічних та хімічних методів впливу, які сприяють інтенсифікації процесів структуроутворення, модифікації структури та поліпшенню властивостей композиційних матеріалів.

За визначенням К. Мейера, активованими твердими тілами вважають матеріали, у яких елементи кристалічної решітки розташовані термодинамічно нестабільно, що супроводжується підвищеним значенням вільної ентальпії.

Відповідно до рівняння Арреніуса, швидкість хімічного процесу визначається енергією активації та температурою, що є основою для розрахунків інтенсивності реакцій.

$$K = 5exp(-Ea/RT) \quad (1.1)$$

Зменшення енергії активації матеріалів досягається за рахунок застосування різноманітних методів впливу, включаючи механічні, механохімічні, гідравлічні, магнітні та інші способи.

Ефективність активації цементів значно підвищується завдяки мокрому подрібненню, яке, хоча і більш результативне, ніж сухий помел, має обмеження при низьких значеннях водоцементного відношення. Роторно-пульсаційні апарати зарекомендували себе як надійний засіб для попередньої активації цементу, забезпечуючи подрібнення частинок і підвищення міцності зразків на 30–40% у першу добу тверднення. Зокрема, в експериментах досягнуто міцності до 180 МПа порівняно з контрольними зразками, які демонстрували лише 50 МПа.

Інтенсифікація зміцнення бетону можлива за допомогою термоакустичної активації, коли суміш піддається акустичному впливу в поєднанні з підвищеною температурою. Такий підхід дозволяє збільшити міцність на 28-й день приблизно в 1,5 рази. Повторне віброущільнення на стадії формування коагуляційної структури сприяє усуненню дефектів, зумовлених

седиментацією та контракцією, підвищуючи довговічність бетону.

Важливим аспектом активації є врахування моменту, інтенсивності та тривалості механічних впливів. Наприклад, повторне вібрування дозволяє збільшити міцність на 10–15%, підвищити морозостійкість та водонепроникність. Дослідження також показують перспективність використання магнітно-механічних, електрогідравлічних і термоелектричних методів впливу.

Особливу увагу привертають дослідження з активації води для замішування. Найбільш відомий метод – електромагнітна обробка, яка змінює структуру води, підвищуючи її гідратаційні властивості, знижуючи поверхневий натяг та в'язкість. Це дозволяє збільшити міцність бетону на 28-й день до 40%.

Механохімія та механоактивація є предметом активних досліджень як у вітчизняних, так і зарубіжних наукових центрах, що підкреслює їхню перспективність у вдосконаленні будівельних матеріалів.

Процеси тонкого подрібнення сировинних матеріалів супроводжуються зростанням внутрішньої та поверхневої вільної енергії, що сприяє підвищенню ефективності технологічних операцій. Останні дослідження приділяють особливу увагу механічним перетворенням сировинних компонентів, які впливають на фізико-механічні властивості та технологію виготовлення будівельних матеріалів.

Основним методом підготовки мінеральної сировини є тонке подрібнення, яке сприяє збільшенню питомої поверхні, а отже, і хімічної активності. Одним із поширених процесів у сучасному виробництві є механоактивація компонентів у млинах, під час якої відбувається руйнування кристалічної решітки та розщеплення силоксанових зв’язків. Це створює активні центри на поверхні силікатів, які сприяють подальшим хімічним реакціям.

Хоча властивості портландцементу добре вивчені, потенціал його використання не розкрито повністю. Це призводить до перевитрати цементу

для досягнення необхідної міцності бетону, що підвищує собівартість кінцевого виробу. Ефективним способом підвищення характеристик цементу є введення тонкодисперсних мінеральних добавок. Вони поділяються на активні, або пуцоланові, і інертні. Ефективність використання добавок визначається не лише їхнім складом, а й ступенем тонкості помолу.

Активація речовин під час подрібнення пояснюється порушеннями у кристалічній решітці та накопиченням дислокацій. Ці процеси сприяють утворенню надлишкової енергії, яка поглинається через хімічні реакції. Розширення виробництва композиційних в'яжучих, зокрема тих, що містять кремнезем, робить питання механоактивації ще більш актуальними.

Таким чином, механоактивація є ключовим напрямком у вдосконаленні будівельних матеріалів, дозволяючи збільшити їхню міцність, зменшити витрату цементу та підвищити економічну ефективність виробництва.

Основну роль у підвищенні міцності цементного каменю відіграє фракція частинок розміром 3-30 мкм, оскільки зерна більшого розміру, зокрема 40-60 мкм і більше, залишаються практично негідратованими. Цю проблему посилюють труднощі рівномірного розподілу води між частинками в'яжучого. Утворення флокул під впливом адсорбції та міжмолекулярних сил зчеплення перешкоджає рівномірному змочуванню, що негативно впливає на процес гідратації.

Швидка гідратація тонких фракцій цементу пояснюється не лише їх високою питомою поверхнею, але й підвищеною щільністю дефектів і дислокацій на їх поверхні. Такі дефекти створюють нерівноважений стан частинок, знижуючи їх хімічну стійкість і активізуючи фізико-хімічні процеси, включаючи гідратацію клінкерних мінералів. На початковій стадії гідратації руйнування зерен цементу починається на дефектах поверхні, що супроводжується рухом дислокацій. Швидкість цих процесів залежить від фізико-хімічних властивостей клінкерних мінералів та меж їх фаз.

Цементна система є складною гідратаційною структурою, тому навіть незначні дози хімічних добавок можуть істотно змінювати процеси гідратації

та твердіння. Мінеральні добавки, залежно від їх складу та активності, впливають на швидкість гідратації цементу, а також здатні зв’язувати портландіт у гідратні фази, що підвищує міцність цементного каменю. Основним завданням створення ефективних активних мінеральних добавок (АМД) є раціональне використання їх впливу на процеси гідратації для досягнення багатофункціонального ефекту. Застосування механоактивації є одним із найефективніших підходів у технології виготовлення комплексних модифікаторів.

Дослідження, проведені з різними типами цементів та органо-мінеральними добавками, дозволили встановити оптимальні параметри їх виробництва, які забезпечують максимальну активність в’яжучих при мінімальних енерговитратах. Використання механоактивації у виробництві дозволяє надавати в’яжучим спеціальні властивості, відкриваючи перспективи для створення високоякісних композиційних в’яжучих.

2 ВИХІДНІ МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ, ЗАСТОСОВУВАНІ В ДОСЛІДЖЕННЯХ

2.1 Схема дослідження

Поєднання методів з теорією матеріалів, базуючись на ймовірнісно-статистичній концепції аналізу, розробленій у працях В.А. Вознесенського, дозволяє пояснити зміну властивостей через зміни структурних характеристик. Це також допомагає оцінити ступінь впливу кожного структурного параметра, виділити найбільш значущі, враховуючи взаємозв’язки і взаємовплив, для ефективного управління властивостями дрібнозернистого бетону або розчину.

Комплексний підхід до вивчення системи структурних параметрів, аналіз механізму поведінки матеріалу у відповідних умовах експлуатації дозволяють встановити взаємозв’язок структурних елементів, визначити найбільш значущі параметри та вивчити механізм їх впливу в ланцюгу «технологічні чинники - структура - властивості». Це сприяє прогнозуванню, оптимізації і управлінню властивостями матеріалу.

З позиції сучасного будівельного матеріалознавства, управління властивостями здійснюється через вплив технологічних факторів і складу на структуру і властивості, а також через розкриття взаємозв’язків між цими елементами. У вирішенні задач оптимізації та управління будівельними матеріалами системний підхід є основним науково-методологічним принципом. Його стратегія, розроблена в працях, базується на моделюванні складних систем і аналізі експериментальних даних.

Відповідно до методології аналізу складних систем, блок-схема дослідження визначає шість основних етапів, що забезпечують комплексний підхід до вирішення проблеми від постановки завдання до практичної реалізації. На рис. 2.1 наведено схему, яка описує ці етапи.

Перший етап включає формулювання гіпотези, мети, завдань та вирішення поставлених завдань. Другий етап передбачає розробку теорії вирішення проблеми. На третьому етапі визнача

ються цілі і завдання дослідження. Четвертий етап охоплює вибір методик і методів дослідження. П’ятий етап включає планування і проведення натурних експериментів. Шостий етап спрямований на багатокомпонентну оптимізацію складів і властивостей дрібнозернистого бетону для улаштування багатошарових конструкцій.

2.2 Матеріали, що використовувались у дослідженнях

Для досягнення мети дослідження — підвищення показників якості цементних розчинів різного призначення, зокрема адгезійної міцності та тріщиностійкості, шляхом модифікації сумішей полідисперсними кремнеземовмісними наповнювачами різного генезису та структури, а також суперпластифікаторами з урахуванням різних способів їх приготування — були обрані доступні на ринку України мінеральні наповнювачі та хімічні модифікуючі добавки.

В'яжуче. У дослідженнях застосовувався портландцемент марки ПЦІ-500-Д0, який використовується для виготовлення відповідальних бетонних і залізобетонних конструкцій у промисловому будівництві. Цей цемент забезпечує високу водостійкість, морозостійкість і довговічність. Він також ефективний для проведення аварійних, ремонтних і відновлювальних робіт завдяки високій початковій міцності бетону. Виробником є ПАТ «Хайденберг Цемент Україна», продукція якого відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010.

Дослідження підтверджують, що використання активних мінеральних добавок є найбільш ефективним для чисто клінкерних цементів 1 типу. У таких цементах відсутні мінеральні добавки (шлак, опока), які самостійно

взаємодіють з клінкерними мінералами, формуючи додаткові гідратні сполуки. Це дозволяє максимізувати ефект дії метакаоліну як хімічно активної добавки.

Застосований портландцемент за мінеральним складом належить до середньоалюмінатних цементів, які є типовими для сучасної вітчизняної цементної промисловості. Основні характеристики цементу наведені у таблицях 2.1–2.2. Для порівняння, цементна продукція «ООО Цемент» належить до низькоалюмінатних цементів, характеристика яких наведена у таблицях 2.3–2.4. Всі параметри портландцементу визначені відповідно до вимог чинних стандартів, зокрема ДСТУ Б В.2.7-46:2010.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад портландцементу ПЦ1

SiO2	A2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	Na2O	K2O	п.п.п.
21,30	5,36	4,36	66,00	1,00	4,00	0,24	0,61	1,51

Таблиця 2.2 – Мінералогічний склад портландцементу ПЦ1

Мінерали	C3S	C2S	C3A	C4AF	PH	N	P
Середнє значення,%	60	17	7	12	0,24	0,61	1,51

Таблиця 2.3 – Хімічний склад портландцементу ПЦ2

SiO2	A2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	N2O	K2O	п.п.п.
22,05	4,73	4,42	65,58	1,62	4,00	0,20	0,60	1,51

Таблиця 2.4 – Мінералогічний склад портландцементу ПЦ2

Мінерали	C3S	C2S	C3A	C4AF	PH	N	P
Середнє значення,%	60	17	7	12	0,24	0,61	1,51

Заповнювач. Як дрібний заповнювач для дрібнозернистого розчину або бетону використовувався кар'єрний пісок Вознесенського (Никитинського) родовища. Це будівельний, промитий, сіяний пісок, який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-232:2010 (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Мінералогічний склад піску

№	Характеристики	Значення, %
1	SiO2, «%	90
2	FeiOs, %	4
3	AI2O3, %	4
4	Вологість, %	4.5
5.	Пустотність, %	47.15
6.	Вміст органічних сумішей, %	1,5

Таблиця 2.6 – Фізичні властивості трепелу Первозванівського родовища Кіровоградської області

Зовнішній вигляд	**Слабкозцементована легка порода**
Колір	Світло-жовтий
Запах	Без запаху
Масова частка вологи, %, не	35-37
Середня густина, кг/м^3	2300
Насипна щільність, кг/м^3	670-700
Втрати при прокалюванні, %	7-9
Пористість, %, не менше	70
Вміст сумішей та піску, %	10-12
Вміст глинистих частинок, %	6-8
Вміст двоокису кремнію, %	84-86
Вміст окису заліза, %	3-3,5
Вміст окису алюмінію, %	3-4

Крупність зерен піску була визначена шляхом просіювання через стандартний набір сит з розмірами отворів 2,5 мм, 1,25 мм і 0,63 мм. Такий фракційний склад обрано відповідно до рекомендацій вітчизняних виробників сухих будівельних сумішей.

Основні фізичні характеристики використаного піску:

- Модуль крупності: 1,25;

- Зміст глинистих і пилових частинок: 1–1,2%;

- Насипна щільність: 1600 кг/м³.

Для регулювання структури та властивостей матеріалу використовувався трепел — мінерал із класу цеолітів, який отримано з Первозванівського родовища Кіровоградського механічного заводу. Використаний трепел відповідає ТУ У14.2-00374485-004:2005 (табл. 2.5). Його помел здійснювався до заданої питомої поверхні 300, 450 і 600 м²/кг. Трепел є універсальним мінералом, який часто застосовується як пуцолановий наповнювач.

Основні характеристики трепелу:

- Основною складовою є кремнезем, частка якого досягає 85%.

- Пориста структура із загальною пористістю до 60%; пори мають відкритий та сполучений характер.

- Завдяки високому вмісту аморфних сполук сприяє покращенню звукоізоляційних властивостей (dB < 58), теплоізоляційних показників ($\lambda < 0,6$) і підвищує водостійкість матеріалу.

Мелений кварцовий пісок. Для регулювання властивостей матеріалів та порівняння з аморфно-кристалічним трепелом використовувався кристалічний кварцовий пісок кар’єрний із Вознесенського (Никитинського) родовища. Пісок розмелювався до оптимальної питомої поверхні 300, 450 і 600 м²/кг.

Мелений кварцовий пісок широко використовується в будівельній галузі як наповнювач для цементу або сухих будівельних сумішей. Він сприяє підвищенню довговічності виробів, їх стійкості до стирання та впливу атмосферних факторів.

Волластоніт ($CaSiO_3$). У дослідженнях використовувався волластоніт

марки МВ-05-96, виробництва ЗАТ «Геоком» (Росія, Калузька область). Це мінерал класу силікатів із формулою $Ca[SiO_3]$, що належить до підкласу піроксеноїдів групи ланцюгових силікатів (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Фізичні та хімічні властивості волластонита

CaO, %, не менше	45-48
SiOs,%, не менше	50-53
MgO,%, не менше	0,4-1
AI20з,%, не більше	0,1-0,3
Fe2O3,%, не більше	0,05-0,2
Кварц, %, не більше	0,5
pH	9,5-10,5
Вологість, %, не більше	0,1-0,2
Коефіцієнт преморнення	1,64
Твердість	4,5-5
Середня густина, г/см^3	2,9
Втрати при прокалюванні	0,5-1,2
Середній діаметр частинок	6
Максимальний розмір частинок	40
Маслоємність, г/100г	40
ДОФ-поглинання, г/100г	55

Завдяки своїй голчастій структурі волластоніт значно знижує можливі процеси усадки, які можуть виникати під час сушіння або експлуатації матеріалів. Збільшення частки волластоніту в складі суміші також сприяє зменшенню водовідділення.

Проведені дослідження та експерименти підтвердили, що оптимальна доза введення волластоніту (ВЛ) становить 5–10% від маси в'яжучого. З представлених на ринку варіантів була обрана фракція МВ-05-96 як найбільш відповідна для використання.

Для ущільнення структури розчину в якості тонкодисперсної мінеральної добавки застосовували високоактивний метакаолін (ВМК). Метикаолін утворюється внаслідок термічної обробки каолініту, основного мінералу каоліну, у температурному діапазоні 600–800°С. ВМК є універсальною пуцолановою добавкою, яка має значні переваги порівняно з іншими добавками, такими як мікрокремнезем. Термічна активація ВМК забезпечує його високу реакційну здатність, що перевищує 1000 мг вапна на 1 г матеріалу, тоді як пуцоланова активність мікрокремнезему сягає лише 400 мг на 1 г. За хімічним складом метикаолін відповідає ТУ У 14.2-363632275-001:2009 (таблиця 2.8). Постачальником ВМК є ТОВ «Мета-Д», м. Дніпропетровськ.

Таблиця 2.8 – Якісні показники метакаоліна

АШ, %	43,8
Si2O2, %,	53,42
Fe2O3, %,	0,75
TIO2, %,	0,58
CaO, %	0,45
Коєфіцієнт відображення, %	77,5
Розчинність у воді, %	0,13
Абразивність, мг	79,4
Дисперсний склад менше 2 мкм, %	55,8
Масова частка залишку на ситі 0,063,	1,32
Втрати при прокалюванні (ППП), %	1,2
Питома поверхня, $м^2/г$	15
Масова частка вологи, %, не більше	1
Зовнішній вигляд	крем порошок
Розсипчастість, %	100
Особливі властивості	не токсичний

Для забезпечення необхідних реологічних і фізико-механічних властивостей дрібнозернистого бетону або розчину широко застосовували водоредукуючі добавки, зокрема суперпластифікатори. Високоефективні суперпластифікатори не тільки покращують показники суміші, але й сприяють економії матеріалів.

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики суперпластифікатора С-3«Хімком Ф

Основні характеристики	Значення показників
Колір	Т емно-коричневий
Щільність, г/см^3	1,15
Зміст сухих речовин, %	30
Водневий показник, pH	9-10

Для інтенсифікації процесів тужавіння та покращення реологічних властивостей використовували суперпластифікатор Melflux 2651 F, розроблений на основі ефіру полікарбоноксилатних кислот. Цей пластифікатор третього покоління від виробника BASF Construction Solutions (Trostberg, Німеччина) застосовується як високоефективний суперпластифікатор, розчинник та компонент, що знижує усадку в сухих будівельних сумішах (СБС).

Таблиця 2.10 – Фізичні властивості гіперпластифікатора Melflux 2651 F

№	Характеристики	Значення
1.	Фізична форма	порошок
2.	Колір	від жовтого до коричневого
3.	Втрати при сушці	макс. 2%
4.	Об'емна густина	300-600 кг/м3
5.	Значення pH при 20°C	6,5-8,5

Melflux 2651 F забезпечує високу ранню міцність, що робить його незамінним для проєктів, де важливі як якість, так і оперативність виконання робіт. Рекомендовані дозування пластифікатора становлять 0,05–1% від маси в'яжучого. Його фізичні властивості наведені у таблиці 2.10.

2.3 Математичне планування експерименту

Експериментальна частина досліджень виконувалася відповідно до попередньо розробленого плану, який відображав залежність між досліджуваними факторами і результатами експериментів. Для аналізу результатів використовували методи математичної статистики, що дозволило сформувати рівняння алгебри, які описують зв’язок між змінними факторами і вихідними параметрами.

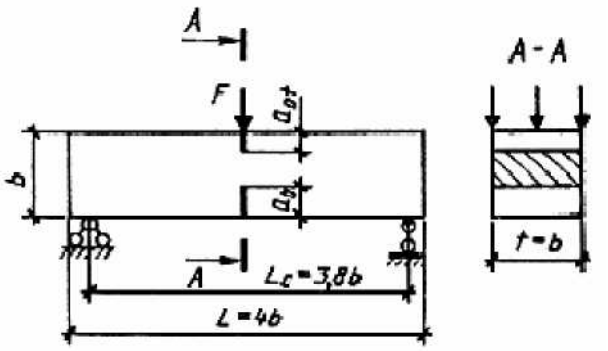


Рисунок 2.2 – призма квадратного поперечного перерізу для випробування на вигин силою ***F*** із закладеною тріщиною в середині прольоту

У процесі розрахунків використовувалася кодована система координат, у якій верхній рівень факторів визначається як +1, нижній — як -1. Центральна точка досліджуваної області збігалася з базисною точкою координат. Значущість коефіцієнтів отриманого рівняння перевірялася за допомогою

критерію Стьюдента, а адекватність моделі — за критерієм Фішера.

Для створення інформаційної бази моделювання застосовували багатофакторні натурні експерименти. Вони були проведені за спеціально синтезованим планом типу MTQ (mixture - technology - quality), який розробив проф. Ляшенко Т.В. Цей D-оптимальний план дозволяє моделювати системи типу "склад - технологія - властивості", що забезпечує глибокий аналіз процесів, які відбуваються в матеріалах.

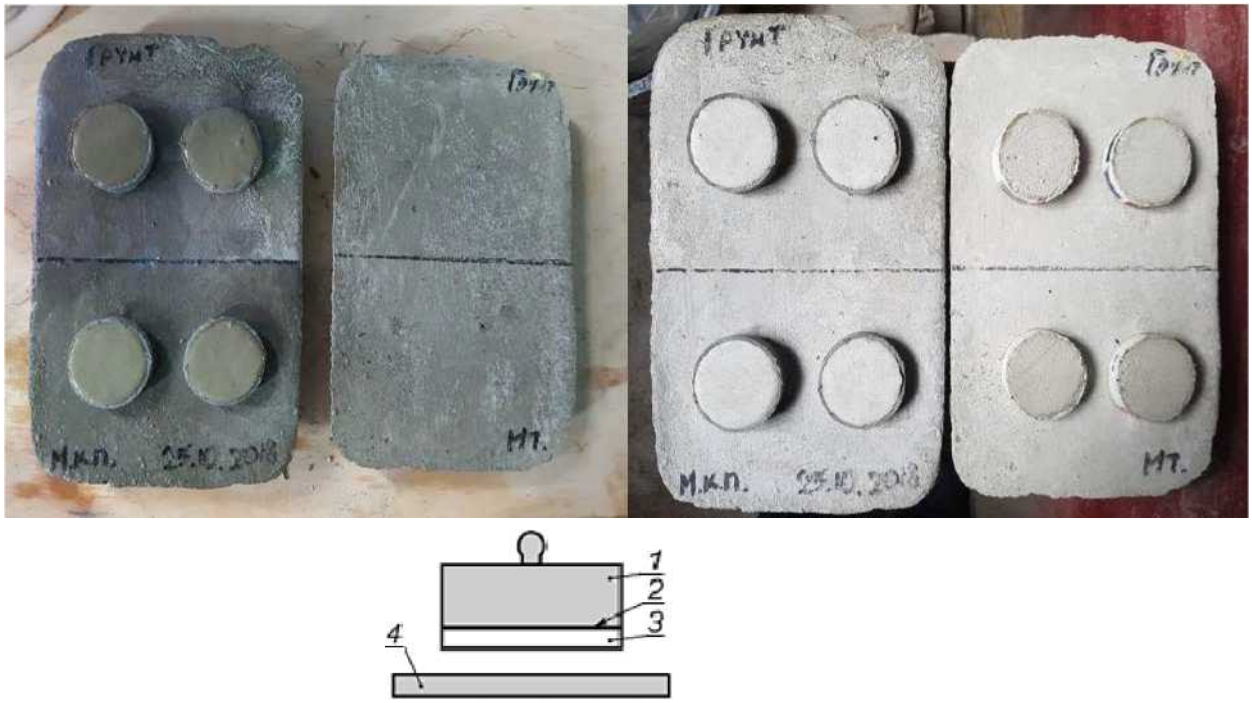


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд зразків при заливці з трафаретом

Рисунок 2.4 – Схема визначення міцності зчеплення
- металевий штамп; 2 - клей; 3 - зразок; 4 - бетонна плита (основа



Рисунок 2.5 – Адгезіометр DYNA Z 16 з цифровим манометром

Таблиця 2.13 – Технічні характеристики приладу DYNA Z16

Зусилля відрива	16 кН
Погрішність	1,5-2%
Позначки на шкалі	0,10 Н/мм^2
Діаметр випробувального диска	50 мм
Температурний діапазон	от -10 до +60°С

Загальновідомо, що набір синтезованих D-оптимальних планів має різну кількість точок. Вибір конкретного плану експерименту залежав від поставлених завдань і необхідних результатів. У рамках цього дослідження використовувався 24-точковий план у вигляді "трикутників на кубі". Таке планування забезпечує комплексне врахування сумішевих і технологічних факторів.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд зразків під час проведення досліду

Використані сировинні матеріали для створення дрібнозернистих розчинів або бетонів (в'яжучі, заповнювачі, мінеральні наповнювачі, хімічні добавки) представляли собою суміші компонентів різної природи і крупності. Їх склад задавався концентраціями компонентів у вигляді масових або об'ємних часток.

Таблиця 2.13 – Технічні характеристики стаціонарного твердоміра ТШ-2

Межі вимірювання твердості	8...450 НВ
Випробувальні навантаження	187.5; 250.0; 750.0; 1000.0; 3000.0 кгс
Межа похибки навантажень не повинна бути більше	±1%
Межа допустимого значення варіації навантажень не повинна бути більше	1%
Відхилення середнього значення числа твердості, отриманого на приладі, що перевіряється, від середньої твердості зразкової міри 2 розряду МТБ, ТУ25.06.1333-76 не повинно бути	- при НВ 200±50 і навантаженні 3000 кгс ±4%
Тривалість витримки випробуваного зразка під навантаженням	10±2; 30±4; 60+6 сек
Допустимі відхилення по ГОСТу 3722-60 ступеня точності 1 групи В. Діаметри сталевих кульок	2,0; 2,5; 5,0; 10,0 мм.
Потужність, споживана приладом від мережі 3-х фазної напруги 220/380 В і частотою 50 Гц	не більше 0,18 кВт.

2.4 Оцінка впливу активації на формування структури та властивостей розчинових сумішей і розчинів

Оцінка впливу активації на реологічні характеристики сумішей та фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів є одним із ключових завдань дослідження. Це включає виявлення як загальних закономірностей, так і локальних особливостей, які визначають якість кінцевого продукту.

Актуальною є розробка пристроїв, які поєднують різні технологічні операції, такі як перемішування компонентів та активація сумішей. Змішувач-активатор — це технологічний апарат, який дозволяє одночасно або послідовно виконувати ці операції.



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд звукоізолюючих конструкцій і зразка

Особливості існуючих змішувачів-активаторів:

1. Відомий змішувач-активатор включає корпус, чашу, привід, редуктор, траверсу, катки, лопаті, електромагнітний віброзбудник і систему управління. У цьому пристрої формування однорідної макроструктури композиту досягається завдяки дезагрегуванню великих частинок через перемішування обертовими лопатями та катками, доповнене вібраційним впливом.

2. Недоліком цього типу змішувача є недостатній рівень диспергування частинок суміші. Це обумовлено тим, що основний механізм подрібнення частинок базується на їх роздавлюванні катками, що обмежує інтенсивність процесу.

3. Більш удосконалений змішувач-активатор додатково обладнаний електромагнітними віброзбудниками, які встановлені по периметру чаші, і системою управління, що забезпечує складний просторовий рух чаші. Така конструкція сприяє підвищенню однорідності суміші за рахунок переміщення компонентів у різних напрямках.

Формування структури матеріалу:

- Макроструктуразабезпечується за рахунок дії обертових лопатей і катків, які сприяють рівномірному перемішуванню компонентів.

- Мікроструктуразалежить від рівня диспергування частинок, що підвищує їх поверхневу активність і забезпечує формування міцних адгезійних зв’язків на молекулярному рівні.

У вдосконаленому змішувачі-активаторі досягнуто підвищення інтенсивності процесів подрібнення завдяки вібраційним впливам. Це сприяє більш ефективному диспергуванню частинок та покращенню якості композиту.

Мета вдосконалення змішувача. Підвищення ступеня диспергування частинок компонентів суміші, що дозволяє покращити характеристики як макро, так і мікроструктури кінцевого матеріалу, знижуючи ймовірність когезійних дефектів і збільшуючи міцність готових виробів.

3 ВПЛИВ НАПОВНЮВАЧІВ І ПЛАСТИФІКАТОРІВ НА СТРУКТУРНО-РЕОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗЧИНОВИХ СУМІШЕЙ

3.1 Аналіз змін реологічних властивостей модифікованих сумішей за впливу наповнювачів і пластифікаторів

Для аналізу взаємодії добавок-наповнювачів і суперпластифікаторів із врахуванням синергетичних ефектів було проведено чотири експерименти за шестифакторним планом MTQ (Ляшенко Т.В.). Наповнювачі подрібнювали до питомої поверхні (Snum) 300, 450 і 600 м²/кг, відповідно до факторів v1, v2, v3, де (v1; v2; v3) = 1. Два експерименти виконували з трепелом, інші два — з піском. Вплив питомої поверхні ілюструється сумішевими діаграмами у вигляді трикутників з ізолініями. Перший експеримент передбачав приготування неактивованих сумішей із піском традиційним способом за В/Ц = 0,5, другий — аналогічний метод із трепелом. У третьому та четвертому експериментах готували активовані суміші з піском і трепелом відповідно, використовуючи швидкісний змішувач із В/Ц = 0,7, де завантаження здійснювали за гранулометрією компонентів.

В результаті експериментів розраховано шість груп шестифакторних ЕС-моделей, що описують зміну структурно-реологічних властивостей під впливом наповнювачів і суперпластифікаторів. Такий підхід дозволив провести порівняльний аналіз показників якості сумішей та розчинів за абсолютними і відносними значеннями. Розрахунки виконували за допомогою COMPEX-99, що реалізує регресивний аналіз із похибкою експерименту менше 0,2%. Для визначення реологічних властивостей використано різні прилади: конус АзНІІ, прилад Суттарда, конус СтройЦНПІ, струшуючий столик. Аналіз показав, що кожен метод ефективний за певного В/Ц або В/Т.

Для активованих сумішей В/Ц = 0,7 найбільш придатний конус АзНІІ, тоді як для неактивованих В/Ц = 0,5 — струшуючий столик. Конус АзНІІ має зменшені вдвічі розміри порівняно зі стандартним конусом, що робить його економічним для розчинових сумішей.

Розрахунок переходів за осадкою і розпливом виконували на основі стандартного конуса і конуса АзНІІ, як це наведено в таблиці 3.1. Для розрахунку використовували формулу Дворкіна Л.Й., де $tg\ a= (30-ОК) / 0,5*D$. Значення $tg\ a>0,25$ вказує на мінімальне розчиновідділення.

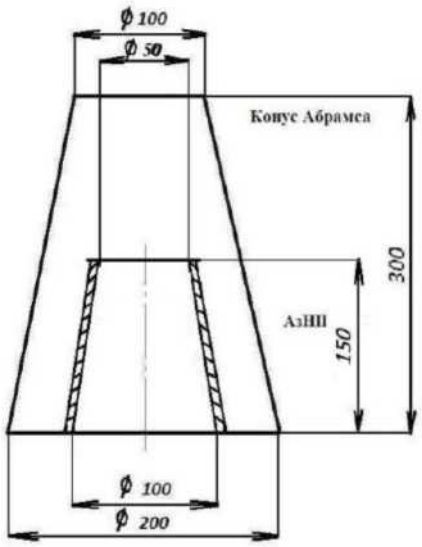


Рисунок 3.1 – Порівняльні розміри конуса Абрамса і АзНІІ

Таблиця 3.1 – Оцінка легкоукладуваності дрібнозернистої розчинової суміші

Марка за рухливістю	Стандартний конус		Буд ЦНІІл, см	Струшуючий столик, мм	Конус АзНІІ		Перехідні коеф. от ОК стандартного конусу к ОК АзНІІ
	ОК, см	Dр, см			ОК, см	Dр, см	
П1	1-3	-	2-3	110-140	0,5-2	-	0,66
П2	3-6	-	3-5	140-170	2-4	-	0,66
П2-П3	5-8	-	4-6	160-180	4-5	-	0,66
П2-П3	8-12	-	6-8	170-200	5-8	-	0,66
П3-П4	12-15	-	7-9	190-220	8-10	-	0,66
П5	15-22	26-30	8-11	210-240	10-14,5	17-20	0,66
П5	22-25	31 і >	10-14	230-280	14,5 і >	20 і >	0,66

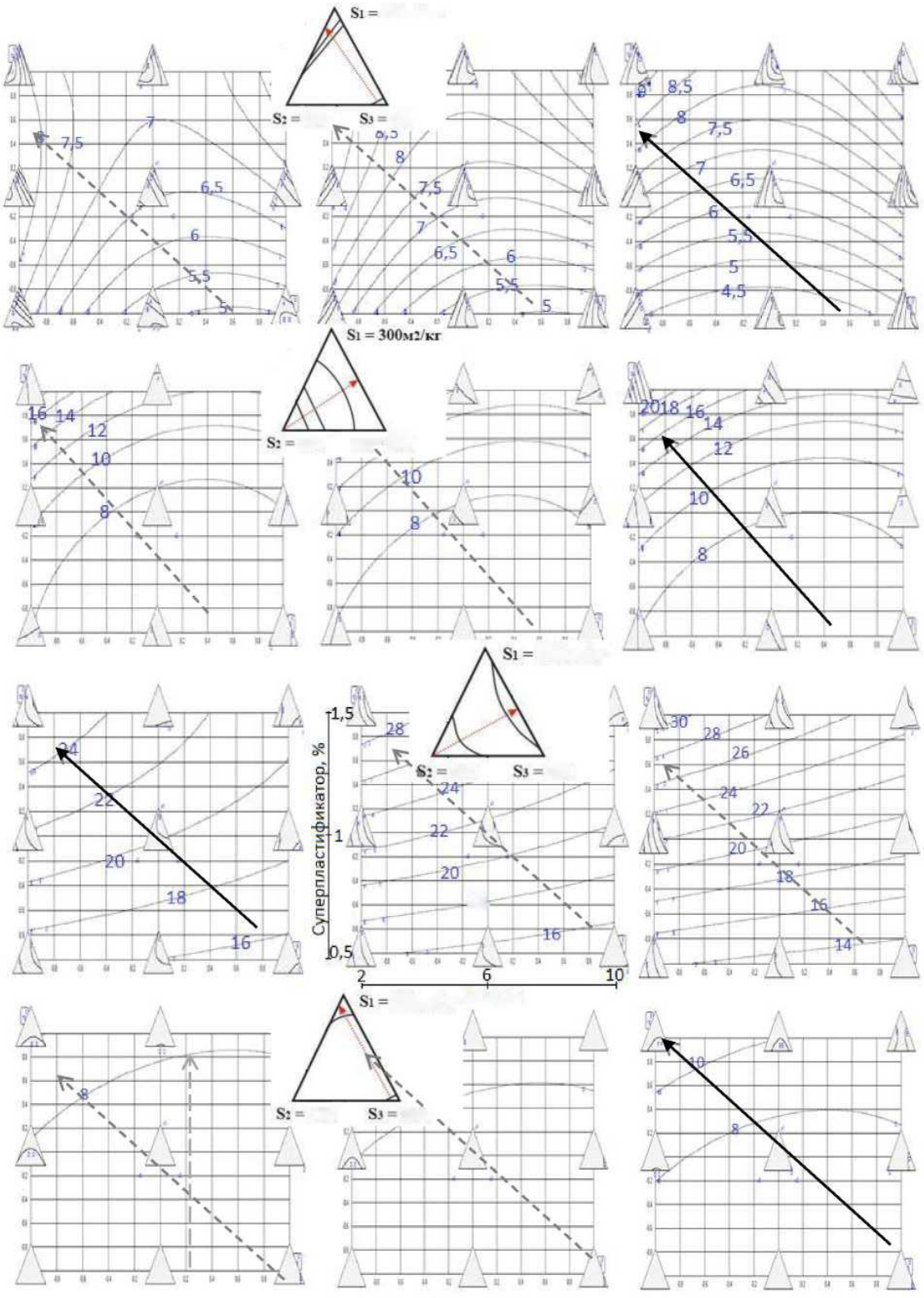


Рисунок 3.2 – Вплив модифікації активованої розчинової суміші різними наповнювачами сумісно з тонкомеленим трепелом і добавками-суперпластифікаторами на рухливість, певний різними способами: а) конус АзНІІ, б) прилад Суттарда, в) струшуючий столик, г) конус СтройЦНПІа

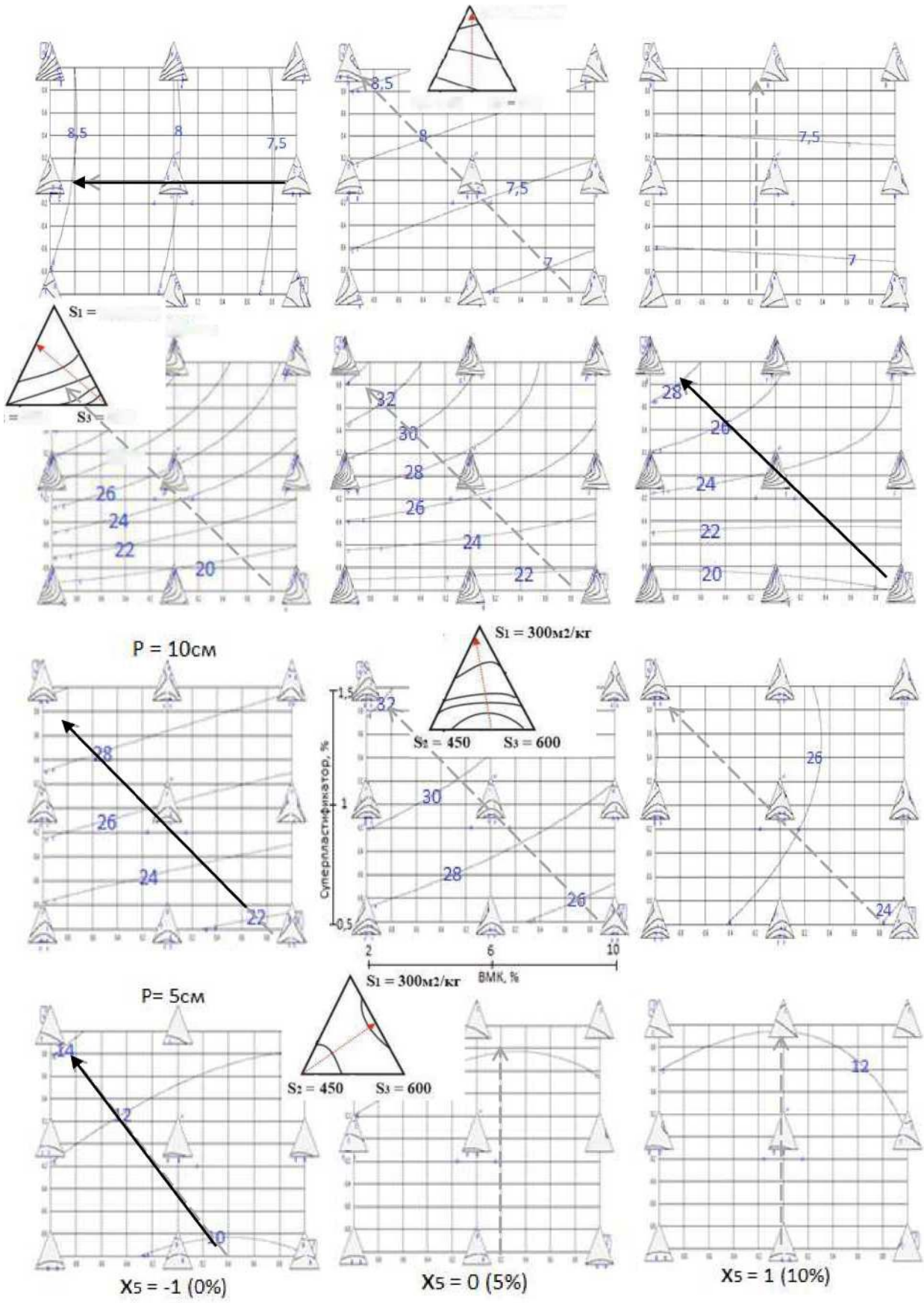


Рисунок 3.3 – Вплив модифікації неактивованої розчинової суміші різними наповнювачами сумісно з тонкомеленим трепелом і добавками-суперпластифікаторами на рухливість, певний різними способами: а) конус АзНІІ, б) прилад Суттарда, в) струшуючий столик, г) конус СтройЦНПІа

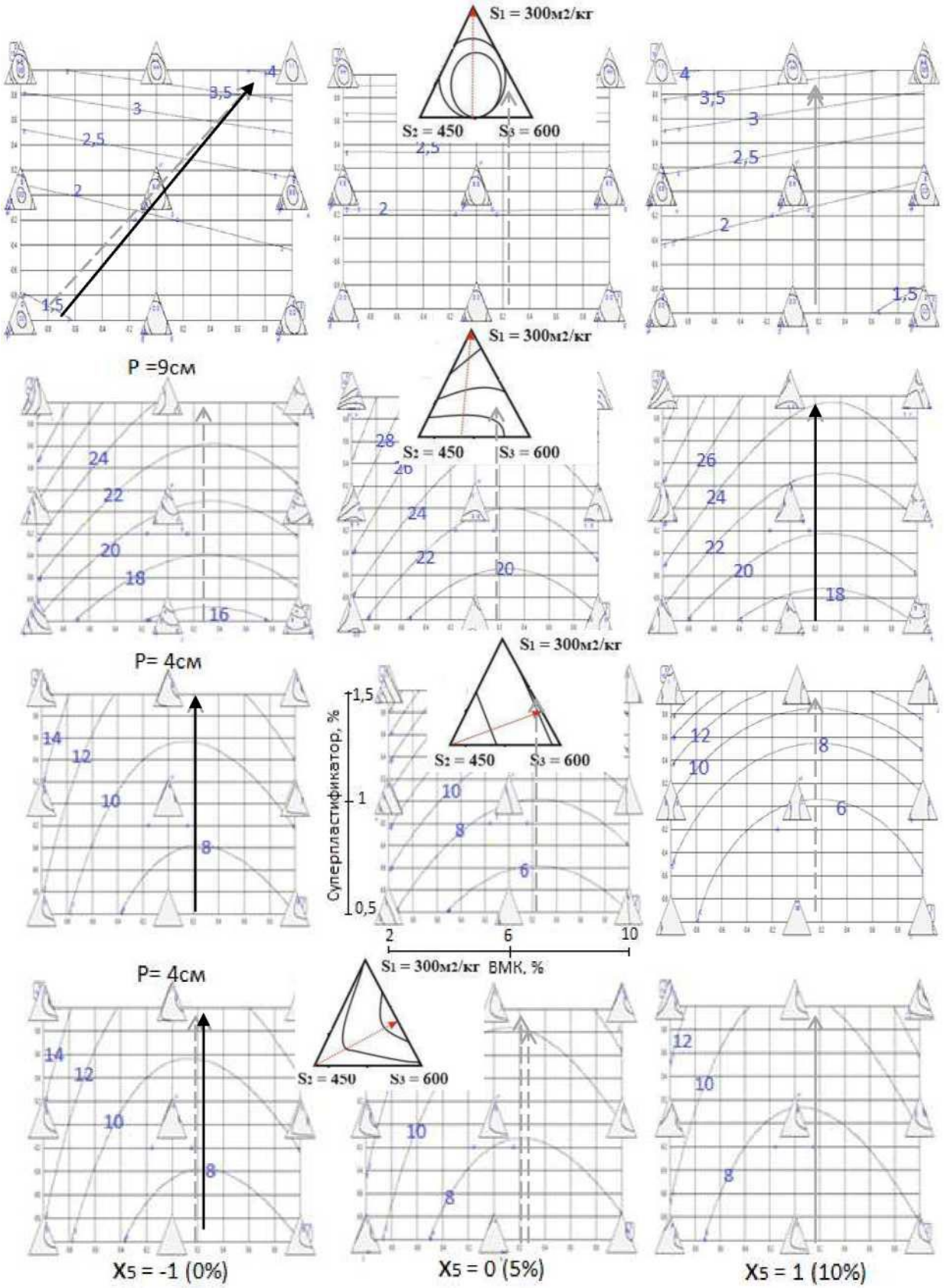


Рисунок 3.4 – Вплив модифікації активованої розчинової суміші різними наповнювачами з тонкомеленим піском і добавками-суперпластифікаторами на рухливість, певний різними способами: а) конус АзНІІ, б) прилад Суттарда, в) струшуючий столик, г) конус СтройЦНПІа

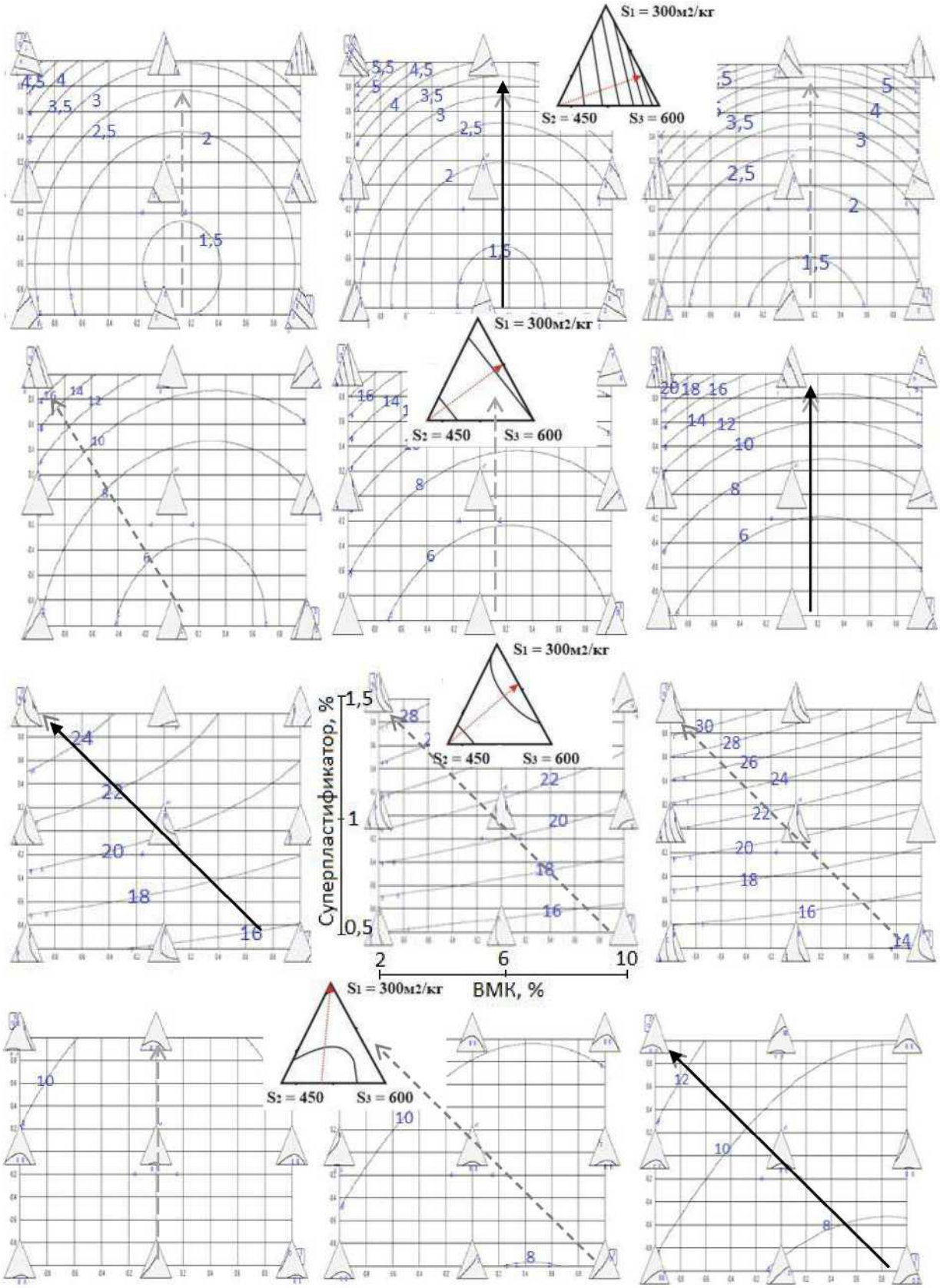


Рисунок 3.5 – Вплив модифікації неактивованої розчинової суміші різними наповнювачами сумісно з тонкомеленим піском і добавками-суперпластифікаторами на рухливість, певний різними способами

3.2 Вплив наповнювачів і пластифікаторів на текучість розчинових сумішей

У розділі 2, пункті 2.2, зазначалося, що в експериментах використовували тонкомелений трепел або кварцовий пісок із питомою поверхнею 300, 450 або 600 м²/кг як щільні та пористі наповнювачі. Як волокнисті наповнювачі застосовували високоактивний метакаолін (ВМК) і волластоніт (ВЛ). У якості пластифікатора використовувався суперпластифікатор С-3 (СП-1).

Технологічна ефективність розчинових сумішей значною мірою залежить від їх рухливості, яку можна регулювати додаванням суперпластифікатора. Встановлено, що рухливість суміші зростає зі збільшенням дозування С-3 до 1,5%, після чого подальше підвищення концентрації пластифікатора вже не впливає. Наприклад, при дозуванні С-3 у 0,2% рухливість збільшується на 35-40% порівняно зі сумішшю без добавки.

Додатково, завдяки розріджувальній дії суперпластифікатора, можливе зниження водоцементного відношення (В/Ц). При оптимальному дозуванні С-3 витрати води зменшуються приблизно на 16% у більшості складів. У тонкомелених цементах це явище виражене сильніше через більшу схильність до флокуляції тонких частинок у цементній суспензії. Пептизуюча дія поверхнево-активної добавки в таких випадках помітніша, ніж у грубомелених цементах.

Проте важливо враховувати, що кількість води, утримуваної цементним тістом, не завжди відповідає обсягу, необхідному для гідратації кожного з мінералів цементу. Розподіл води між мінералами залежить від їх фізико-хімічних властивостей. Наприклад, головним споживачем води на початкових стадіях тужавлення є аліт (C_3A). При низькому В/Ц води може виявитися недостатньо для гідратації інших мінералів і формування кристалічних новоутворень, що негативно впливає на структурну стійкість і міцність

розчину.

Таким чином, зменшення В/Ц доцільне лише за умови, що воно відбувається за рахунок надлишкової води, яка не бере участі у процесах структуроутворення. Надмірне зменшення В/Ц без врахування цих факторів може погіршити властивості суміші.

Для точного розуміння процесів, що відбуваються під час тужавлення і твердіння бетону, важливо було б визначити фактичні діючі водо-цементні (В/Ц) співвідношення для кожного з мінералів цементу окремо. Це дозволило б розрахувати оптимальні інтервали В/Ц залежно від мінералогічного складу, дозування гіпсу та тонкощі помелу цементу. Нижня межа цього інтервалу відповідала б мінімальній кількості води, необхідній для нормального протікання процесів структуроутворення в цементному камені.

Дослідження показали, що додавання суперпластифікатора знижує В/Ц відношення в середньому на 16% незалежно від складу, хоча не всі склади демонструють при цьому приріст міцності. Рухливість сумішей, приготованих у швидкісному змішувачі та традиційним способом, демонструє відмінності, які ілюструються діаграмами, представленими на рис. 3.2–3.6. Як видно, ізолінії рухливості для сумішей однакового складу змінюють напрямок залежно від способу приготування, що свідчить про значну чутливість сумішей до зовнішніх впливів.

Активація розчинових сумішей позитивно впливає на їхню рухливість, причому активація на трепелі забезпечує більший приріст рухливості порівняно з активацією на піску. Модифіковані суміші мають рухливість у межах ОК = 6–16 см для рухомих і ОК = 20–30 см для високорухливих складів. На діаграмах, побудованих за ЕС-моделями, виділяються області сумішей П3 із рухливістю ОК = 8–10 см і П5 із ОК = 20–22 см.

Різна щільність ізоліній, зображених на діаграмах у вигляді квадратів і трикутників при однаковому інтервалі зміни $\Delta D = 2$ см, вказує на відмінності швидкості фізико-хімічних процесів у активованих сумішах порівняно з неактивованими. Для активованих сумішей зміна рухливості відбувається в

1,5–2 рази швидше за показник Δ°АС/НАС і в 1,3 рази швидше за показник Δ&АС/НАС.

Зміна рухливості сумішей залежно від питомої поверхні наповнювача, зокрема трепелу або піску, ілюструється на діаграмах (рис. 3.7–3.8), що дозволяє краще зрозуміти вплив цих факторів на реологічні властивості сумішей.

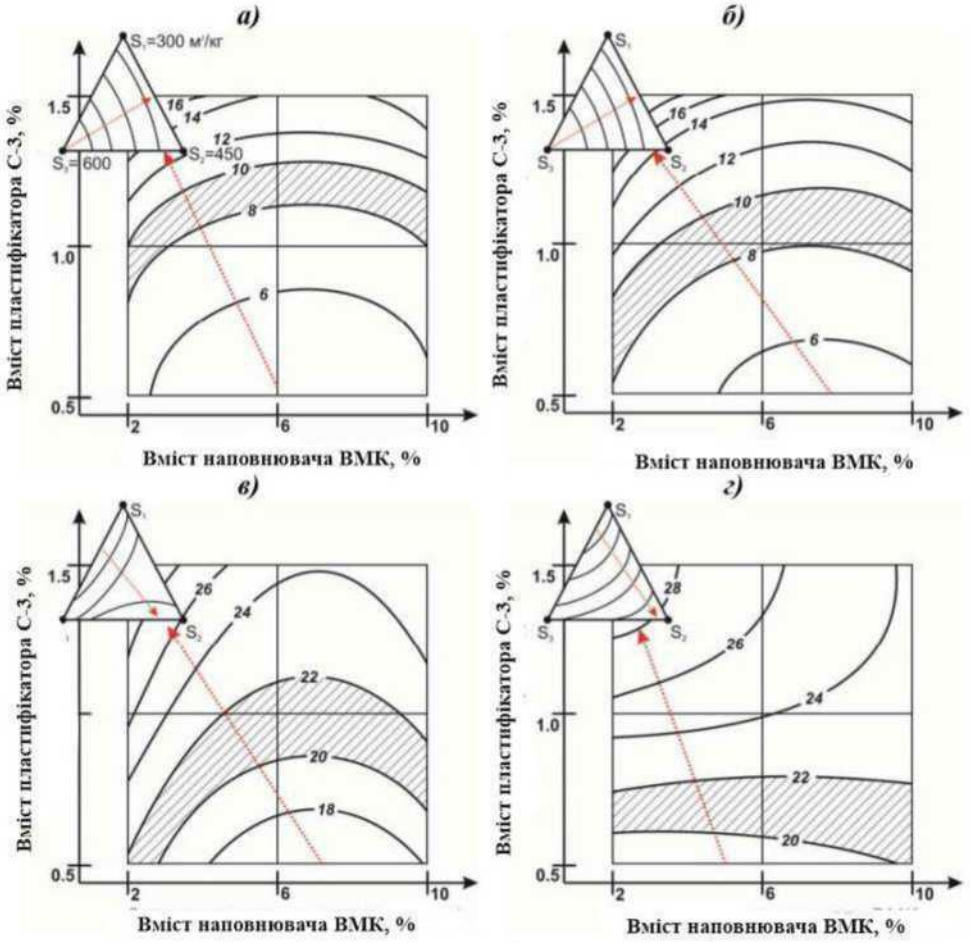


Рисунок 3.6 – Вплив на рухливість модифікованих сумішей вмісту ВМК, С-3, питомої поверхні піску або трепелу та способа приготування - неактивованих сумішей з тонкомеленим піском (а), трепелом (б) - активованих сумішей з тонкомеленим піском (в), трепелом (г)

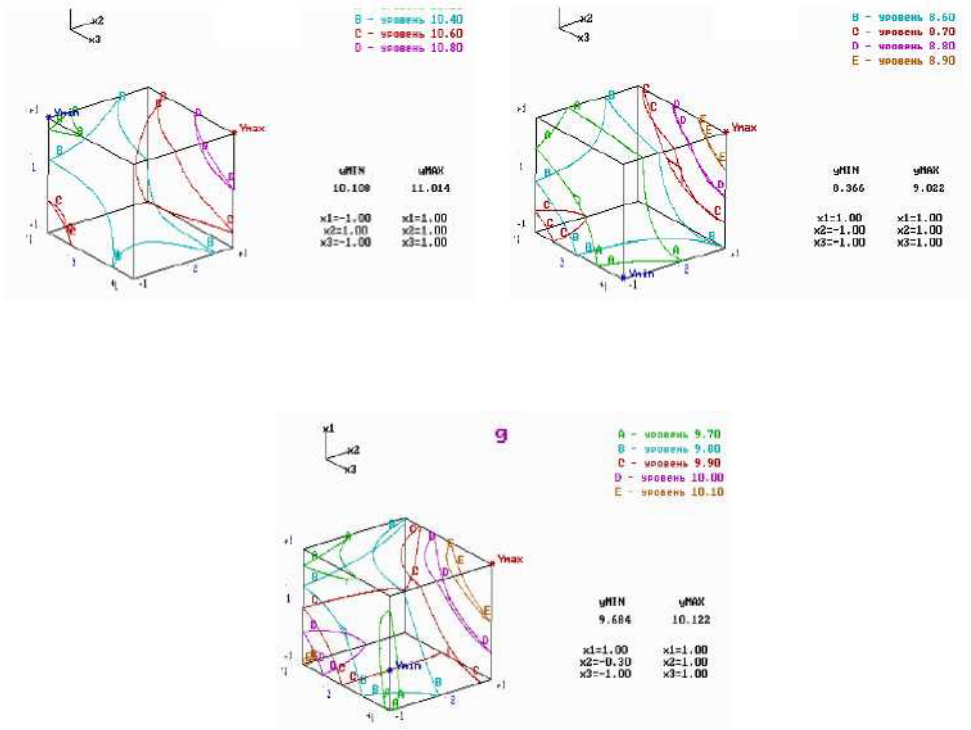


Рисунок 3.7 – Вплив наповнювача у вигляді трепелу з різною Snum на рухливість активованої суміші а) Si=300 м2/кг; б) S2=450м2/кг, в) S3=600 м2/кг

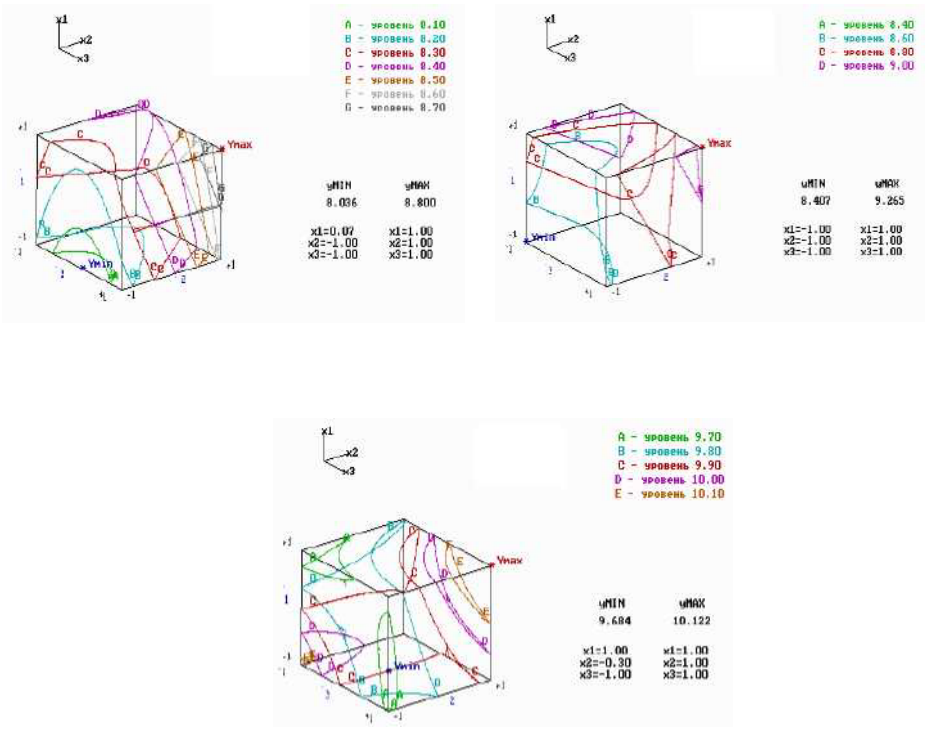


Рисунок 3.8 – Вплив наповнювача у вигляді піску з різною ***Snum*** на рухливість активованої суміші а) S1=300 м^2/кг; б) S_2=450м^2/кг, в) S_3=600 м^2/кг

3.3 Вплив наповнювачів і добавок на розчиновідділення

Розчиновідділення є наслідком недостатньої зв'язності між поверхнею твердої фази та рідким дисперсійним середовищем, що виникає через надлишок або нестачу суперпластифікатора С-3 у поєднанні з ВМК, незалежно від вмісту ВЛ. Зміна цього показника визначалася за формулою: $tg\ \alpha = (30 - ОК) / 0,5 \cdot D$.

Якщо $tg\ \alpha > 0,25$, величина розчиновідділення вважається мінімальною та допустимою. На діаграмах (рис. 3.10) видно, що модифіковані суміші на основі трепелу мають високі значення tg α, що значно перевищують 0,25, отже, розчиновідділення в таких сумішах, особливо для рухливих, не спостерігається.

Суміші з максимальним вмістом ВМК (6-10%) і мінімальним вмістом С-3 (0,5%) на активованому трепелі демонструють мінімальне розчиновідділення ($tg\ \alpha < 0,25$). Розплив (Dp) таких сумішей коливається в межах 6–12 см (рис. 3.9). У той же час для сумішей на неактивованому піску виділяється область з неприпустимими значеннями $tg\ \alpha < 0,25$.

На основі даних (табл. 3.5) було визначено перехідні коефіцієнти між осадкою та розпливом для стандартного конуса і конуса АзНІІ. Перехідний коефіцієнт становить 0,66. Перерахунок показників АзНІІ до значень стандартного конуса дозволив застосувати формулу Дворкіна Л.Й. для оперативної оцінки розчиновідділення суміші.

Діаграми змін осадки та розпливу конуса за даними АзНІІ наведені на рис. 3.1–3.4 та 3.9 відповідно. Діаграми зміни розчиновідділення, побудовані за моделями, представлені на рис. 3.10. Для активованої розчинової суміші, модифікованої трепелом, у всій області факторного простору значення $tg\ \alpha > 0,25$, варіюючись від 0,3 до 1,1. Ураховуючи дисперсність, розчиновідділення суміші може бути зменшено до значень $tg\ \alpha = 0,6–0,7$ (рис. 3.9). Для неактивованих розчинів із меленим піском у діаграмі (рис. 3.9) заштриховано область із недопустимими значеннями.

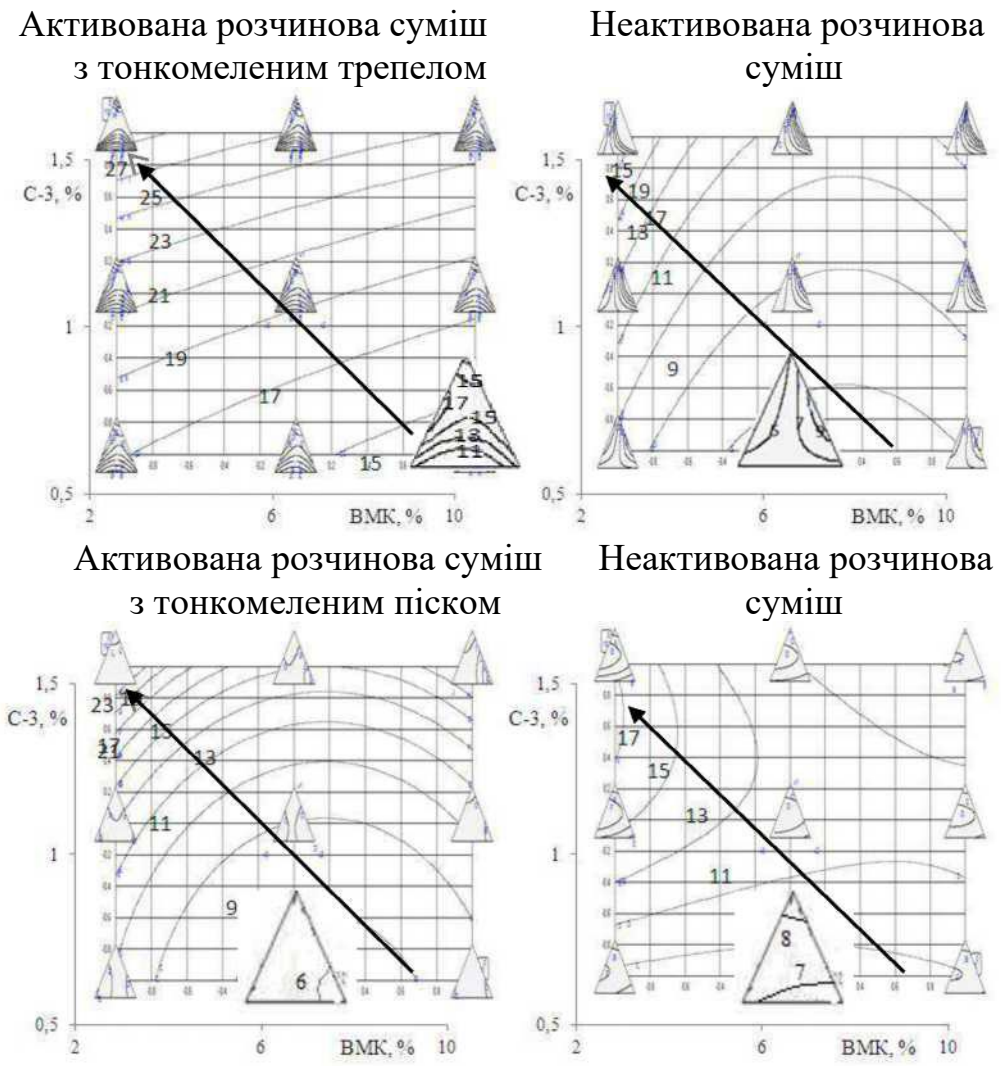


Рисунок 3.9 – Вплив модифікації розчинової суміші різними наповнювачами і добавками-суперпластифікаторами на розплив ***Dp*** суміші на конусі АзНІІ

3.4 Вплив наповнювачів і пластифікуючих добавок на розшаровуваність розчинових сумішей

Розшаровуваність розчинових сумішей визначалася згідно з ДСТУ Б В.2.7-239-2010 «Розчини будівельні. Методи випробувань». Вона є важливим показником якості розчинних сумішей. Суміш вважається такою, що не розшаровується, якщо її показник П = (ΔV) / EV × 100 менше 5%.

Згідно з нормами ДСТУ, показник розшаровуваності не повинен перевищувати 5% для рухливих і 4% для високорухливих сумішей. На діаграмах (рис. 3.11) представлено зміни розшаровуваності під впливом різного вмісту ВЛ, С-3 і ВМК. Області на діаграмах ілюструють суміші, які не розшаровуються, а також ті, що мають похибку понад 5%.

Неактивовані суміші з меленим піском (ТМ/П) майже не розшаровуються. У той же час активовані суміші з меленим трепелом (ТМ/Т) при вмісті С-3 менше 1% і за відсутності або мінімальному вмісті ВЛ демонструють перевищення нормативного показника розшаровуваності. Це може свідчити про недостатню пластифікацію сумішей. Збільшення вмісту С-3 до 1,0–1,5% сприяє зниженню розшаровуваності, незалежно від кількості ВЛ та ВМК. Таке зменшення може бути пов’язане з високорозвиненою структурою порового простору наповнювачів.

Розшаровуваність також залежить від седиментації щільних або спливання легких частинок трепелу з питомою поверхнею Snum2 та Snum3. Це явище спостерігається в основному в неактивованих сумішах. Часткове спливання легких частинок відбувається лише в одиничних складах. У таких випадках ВЛ і ВМК у оптимальній кількості виконують роль стабілізаторів і гомогенізаторів сумішей.

Трепел, який має високу мікро- і нанопористість, характеризується щільністю, що є на 1,5 рази меншою за щільність кварцового піску. Найдрібніші частинки трепелу можуть виконувати роль стабілізаторів сумішей, тоді як частинки середнього розміру замість осідання, характерного для меленого піску, демонструють тенденцію до спливання. У випадках спливання показник розшарованості може набувати від’ємних значень.

Отже, для АС і НАС важливо визначення таких показників, як розшарування і розчиновідділення, що, однак, не передбачено умовами ДСТУ для СБСМ. В цілому, процес активації сумішей знижує розчиновідділення. ВЛ в кількості 6-7% дещо збільшує розчиновідділення, але в межах норми і підвищує рухливість суміші, хоч і не так значно, як пластифікатор С-3.

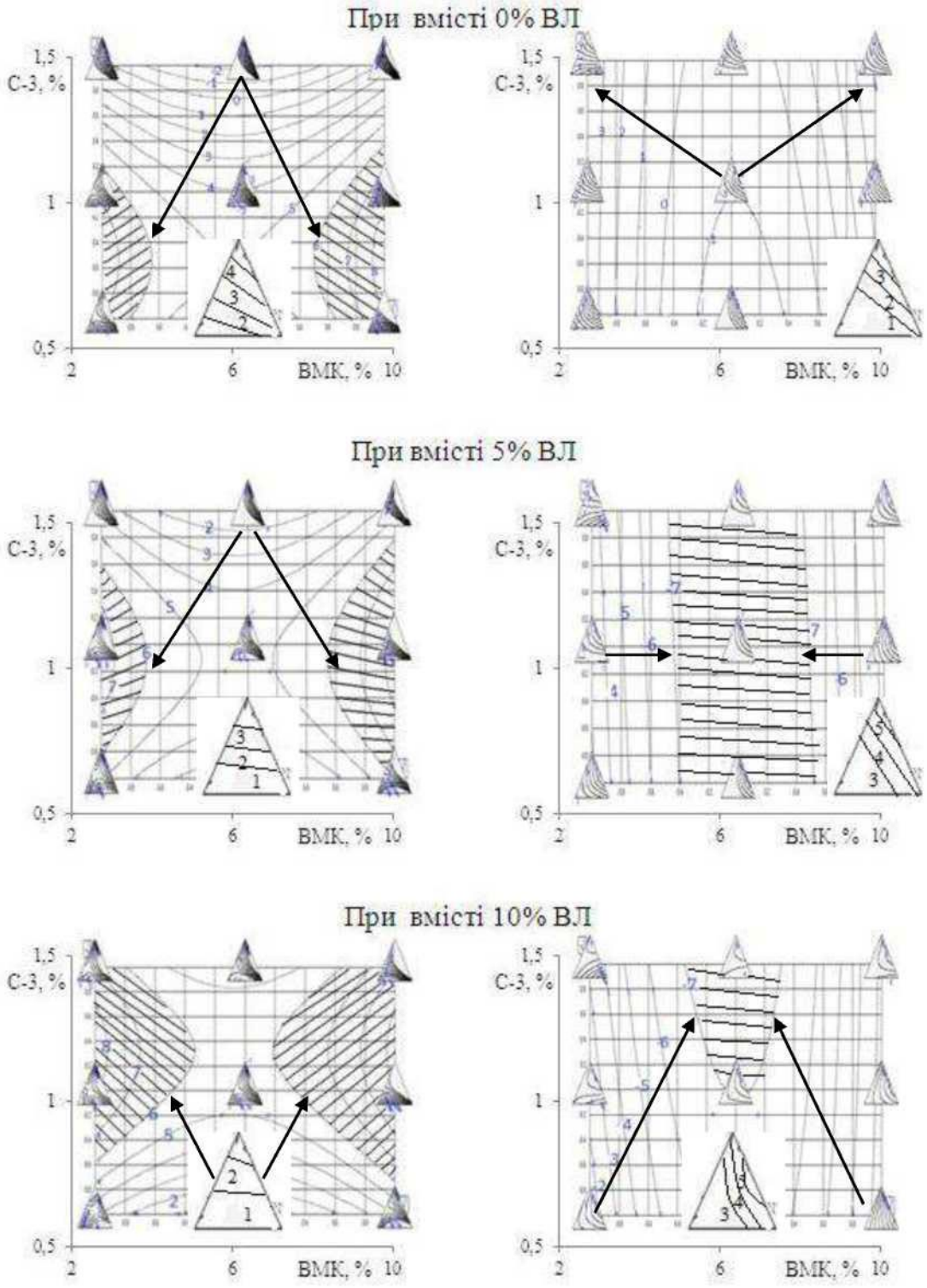


Рисунок 3.11 – Вплив модифікації розчинової суміші різними наповнювачами і добавками-суперпластифікаторами на показник розшаровуваності ***П*** суміші

3.5 Вплив наповнювачів і пластифікуючих добавок на час життєздатності розчинових сумішей

Час життєздатності цементного тіста є однією з ключових технічних характеристик, яка визначає тривалість перебування суміші в пластичному стані. Цей показник оцінюється через строки тужавлення цементного тіста нормальної густоти. Введення суперпластифікатора, крім розрідження суміші, відтерміновує момент початку тужавлення, сповільнюючи хімічні реакції між мінералами цементу та водою.

Стандартний метод визначення строків тужавлення є умовним і не враховує швидкості зниження рухливості суміші. Цементи можуть мати однакові строки тужавлення, однак процеси втрати рухливості в кожному випадку мають свою динаміку. У дослідженні час життєздатності модифікованих сумішей визначався як проміжок часу між початком і кінцем тужавлення. На діаграмах (рис. 3.12) виділено області, які відповідають вимогам ДСТУ (початок тужавлення ≥60 хв, кінець ≤10 год), та області, які їм не відповідають.

Коригування строків тужавлення можливе через зміни складу та способу приготування сумішей. Збільшення вмісту С-3 відтерміновує початок тужавлення, але введення ВЛ ($CaSiO3$) разом із ВМК сприяє прискоренню гідратації через накопичення іонів кальцію в рідкому середовищі. Початок тужавлення в сумішах варіюється від 50 до 180 хв, а період життєздатності — від 120 до 270 хв залежно від типу наповнювачів, рухливості та способу приготування.

Суміші з трепелом схоплюються повільніше, ніж із кварцовим піском, через підвищений вміст кремнієвої кислоти, що знижує pH. Проте наприкінці тужавлення процес прискорюється завдяки зв’язуванню гідроксиду кальцію. Вимоги ДСТУ щодо часу життєздатності забезпечуються при оптимальних комбінаціях компонентів: для активованих сумішей із трепелом (Snum = 600

м²/кг) за вмісту ВМК = 10%, ВЛ = 10%, С-3 = 0,5–1%; для неактивованих сумішей із трепелом (Snum = 450 м²/кг) за вмісту ВМК = 10%, ВЛ = 5–10%, С-3 = 1–1,5%.

Активація сумішей і наявність тонкомеленого трепелу скорочують час до початку тужавлення навіть за підвищеного В/Ц або В/Т. Наприклад, у активованих сумішах із трепелом (АС/Т) цей показник знижується з 60 до 45 хв, що свідчить про прискорені фізико-хімічні процеси у порівнянні з неактивованими сумішами (НАС). Це підтверджує висновок про вищу швидкість структуроутворення в активованих сумішах.

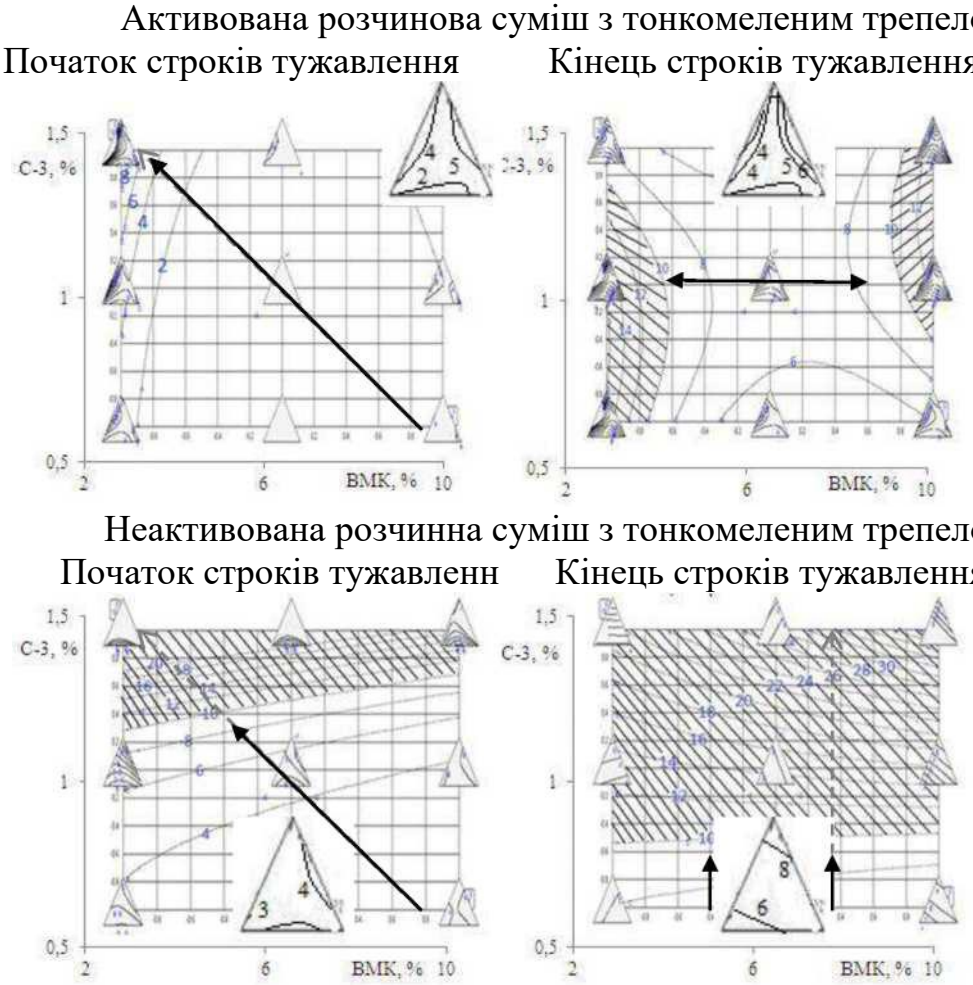


Рисунок 3.12 – Вплив модифікації розчинової суміші різними наповнювачами і добавками-суперпластифікаторами на строки тужавлення ***m***

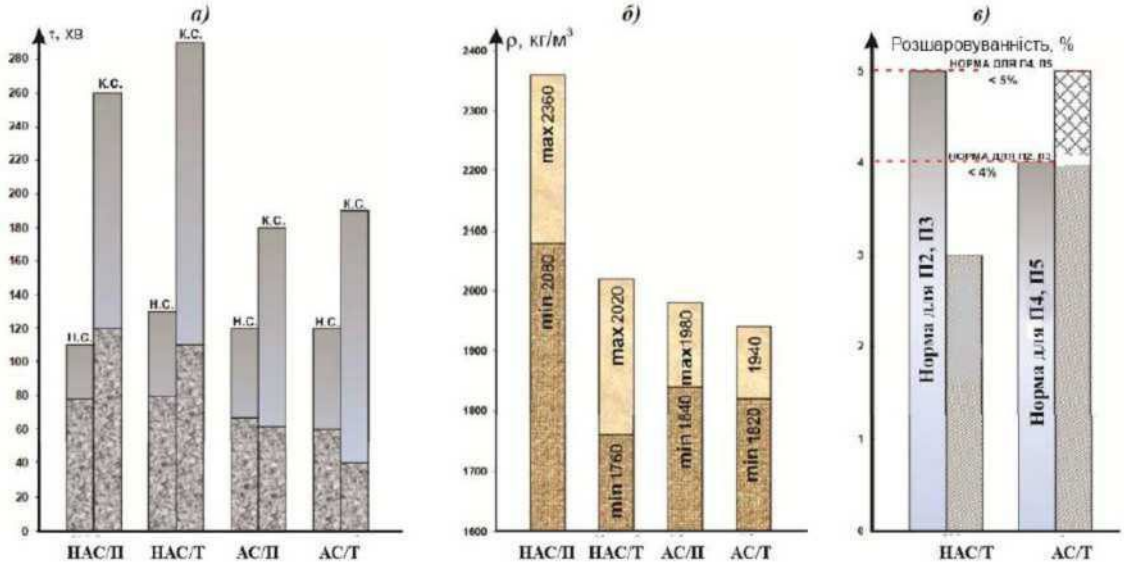


Рисунок 3.14 – Зміна абсолютних значень властивостей розчинових сумішей: а) - строків тужавлення; б) середньої густини сумішей; в) розшаровуваності

Таблиця 3.2 – Оптимальні склади сумішей з трепелом для забезпечення найкращих показників якості

Спосіб приготування		Активовані наповнювачі:				Неактивовані наповнювачі:			
Назва властивостей		***Dр***	***tg Ф***	***П***	***Рсм***	***Dр***	***tg Ф***	***П***	***Рсм***
		трепел				***трепел***			
Склад	С-3, %	1,5	*0,5*	0,5	1	1,5	-	-	-
	ВМК, %	6	10	6	10	6	-	-	-
	ВЛ, %	5	10	10	10	5	-	-	-
	Зуд.тр.	600	300	300+450	450+600	300+450	-	-	-

Таблиця 3.3 – Оптимальні склади сумішей з кварцовим піском для забезпечення найкращих показників якості

Спосіб приготування		Активовані наповнювачі:				Неактивовані наповнювачі:			
Назва властивостей		***Dр***	***tg Ф***	***П***	***Рсм***	***Dр***	***tg Ф***	***П***	***Рсм***
		пісок				***пісок***			
Склад	С-3, %	1,5	-	-	-	1,5	1	1	1
	ВМК, %	6	-	-	-	6	10	6	10
	ВЛ, %	5	-	-	-	5	10	10	5
	Syд.пес.	450+600	-	-	-	300+600	450	450	600

3.6 Порівняльний аналіз впливу виду наповнювача на структурно-реологічні властивості розчинових сумішей

Аналіз тенденцій поведінки сумішей на наповнювачах, які містять кремнезем різного походження, структури та дисперсності, свідчить про те, що механізми формування структури в таких сумішах протікають по-різному. Це, своєю чергою, впливає на рівень зміни фізико-механічних властивостей готових матеріалів.

На підставі зведених даних, представлених у таблицях 3.2–3.3, можна зробити висновок, що для різних складів сухих будівельних сумішей (СБСМ) нераціонально застосовувати одні й ті ж органо-мінеральні комплекси. Проведені обчислювальні експерименти за численними математичними моделями ЕС показують, що навіть при рівнорухливих умовах (n=const) реологічні показники сумішей, які характеризують їхню ефективність у процесі технологічної обробки, можуть суттєво відрізнятися (табл. 3.4).

Аналіз тенденцій поведінки сумішей на наповнювачах, які містять кремнезем різного походження, структури та дисперсності, свідчить про те, що механізми формування структури в таких сумішах протікають по-різному. Це, своєю чергою, впливає на рівень зміни фізико-механічних властивостей готових матеріалів.

Загальний аналіз отриманих даних дозволяє стверджувати, що наповнювачі різного типу та суперпластифікатор С-3 чинять неоднаковий вплив на здатність сумішей до деформування в процесі технологічної обробки. Зокрема, різні наповнювачі та способи приготування сумішей, такі як використання тихохідних або швидкісних змішувачів, мають вирішальне значення (табл. 3.5). Реологічна ефективність залежить від гранулометрії наповнювачів, типу суперпластифікатора та застосовуваних технологій підготовки сумішей.

Таблиця 3.4 – Реологічні показники равнорухливих ***n=const*** сумішей

№ п/п	Умовні позначення сумішей	Рухливість			pmin кг/м^3	Розчино-відділення	Розшаро-вуваність, %	Час життє-здатності, хв	Строки тужавлення, хв	
		П3	П4	П5					п.т	к.т.
1.	НАС/П (С-3)	+	-	-	2100	tg a>1	1-3	140	120	260
2.	НАС/Т (С-3)	+	-	-	1820	tg a>1	2-7	230	130	360
3.	АС/П (С-3)	-	-	+	1900	tg a>0,5	1-5	130	110	240
4.	АС/Т(С-3)	-	-	+	1650	tg a>0,5	2-7	235	120	340
5.	НАС/П (Mel)	-	+	-	1720	tg a>1	<<5	160	100	220
6.	НАС/Т (Mel)	-	+	-	1680	tg a>1	<<<5	170	90	310

Таблиця 3.5 – Значення властивостей активованих і традиційно приготованих складів з тонкомеленим трепелом / піском

№	Назва властивостей	Умовні позначення Одиниці вимірювання	Цементно-піщані розчини з тонкомеленим трепелом				Цементно-піщані розчини з тонкомеленим піском			
			актив.		неактив.		актив.		неактив.	
			min	max	min	max	min	max	min	max
1	Рухливість (ОК)	***ОК***	7	32	5	30	2	28	4	30
		А	25		25		26		26	
		S	S_3	S_2	S_2+S_3	S_2+S_1	S_2	S_2+S_3	S_3	S_1+S_3
2	Рухливість (Dp)	***DP***	4	6	3	7	1	3	1	4
		А	2,0		4,0		2,0		3,0	
		S	S_2	S_2	S_1+S_2	S_3	S_1+S_2	$S_1+S_2+S_3$	$S_1+S_2+S_3$	S_2
3	Розчиновід-ділення	***P, tg ϕ***	0,5	0,9	-	-	-	-	0,2	0,5
		А	0,4						0,3	
		S	S_i	S_1+S_2	-	-	-	-	S_2	S_1+S_3
4	Розшаро-вуваність	***П***	2	6	0	4	1	4	2	6
		А	4,0		4,0		3,0		4,0	
		S	$S_i+S_:$	S_2+S_3	-	-	-	-	S_2	S_1+S_3
5	Середня густина сумішей	***$P_{см}$***	1,68	1,98	1,82	2,1	1,9	2,2	2,0	2,4
		А	0,3		0,28		0,30		0,40	
		S	S_1	S_2+S_3	S_1+S_3	S_2+S_3	S_1	S_2+S_3	S_1+S_2	S_3

На підставі зведених даних в табл. 3.5 можна зробити ще один важливий висновок, що в складах СБСМ раціонально застосовувати бінарні наповнювачі.

4 ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ СУМІШЕЙ ДЛЯ МОДИФІКОВАНИХ РОЗЧИНІВ З РІЗНИМИ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

4.1 Етапи багатокритерійної оптимізації складів і властивостей

Багатокритерійна оптимізація складів і властивостей будівельних матеріалів є актуальною і складною задачею, розв'язанню якої сприяє використання математичного моделювання і сучасних комп'ютерних методів аналізу. З розвитком комп'ютерного матеріалознавства стали можливими нові підходи до аналізу та оптимізації складу, структури й властивостей будівельних матеріалів. Завдяки цьому науковому напрямку виникли принципово нові можливості для вирішення задач такого типу.

Технологічні процеси в будівельному матеріалознавстві характеризуються високою складністю та численними взаємозв'язками, які впливають на кінцеві характеристики матеріалів. Для того щоб вибрати оптимальні параметри технологічного процесу, необхідно кількісно оцінити ці взаємозв'язки та розглянути всі можливі варіанти. Це завдання стає здійсненним завдяки застосуванню високопродуктивних комп'ютерних технологій, що дозволяють проводити багатофакторний аналіз складів і властивостей композиційних матеріалів.

Оптимізаційний підхід у цій сфері ґрунтується на формалізації задачі, яка визначає мету і критерії оптимізації, після чого рішення здійснюється за допомогою чіткого алгоритму. Такий алгоритм не обмежує варіативність рішень, а навпаки, створює базу для порівняння та вибору оптимального варіанту. У цьому контексті алгоритм виконує функцію чіткого інструменту для об'єктивного аналізу та вибору.

Оптимізаційний процес зазвичай проходить три стадії:

- Формування задачі, де визначаються цілі, критерії та обмеження.

- Знаходження оптимальних умов шляхом математичного моделювання і застосування алгоритму оптимізації.

- Реалізація отриманих оптимальних умов на практиці.

У матеріалознавстві та технології будівельних матеріалів поведінка досліджуваної системи оцінюється за кількома критеріями якості, оптимальні значення яких зазвичай не збігаються. Це призводить до формулювання багатокритеріальної задачі, яка вимагає прийняття компромісних рішень. У таких випадках головним завданням є досягнення балансу між суперечливими критеріями для забезпечення оптимальних характеристик досліджуваного матеріалу.

При вирішенні технологічних завдань однією з найважливіших проблем є вибір складу, дисперсності та режимів виготовлення матеріалів із заданими властивостями при мінімальних витратах ресурсів. У цьому контексті задача оптимізації зводиться до виявлення в факторному просторі зони, що відповідає необхідним рівням характеристик матеріалу. Усередині цієї зони обирається оптимальний склад, який забезпечує максимальну якість за мінімальних витрат.

Складні технологічні процеси зазвичай не можуть бути повноцінно оцінені лише основними критеріями якості, особливо коли мова йде про поліфункціональні матеріали, які повинні поєднувати кілька специфічних властивостей. У таких випадках використовуються додаткові критерії, що дозволяють краще врахувати особливості процесу. Хоча математична теорія планування експерименту не дає однозначних рішень у багатокритеріальних задачах, вона допомагає обґрунтувати компромісні рішення. На жаль, формальної теорії прийняття компромісних рішень поки що не існує, і остаточний вибір часто залежить від кваліфікації технолога.

Для вирішення багатокритеріальних задач пропонується наступна стратегія поетапної оптимізації:

Перший етап. Виділяються основні критерії якості на основі нормативно-технічної документації. Проводиться відсів неефективних рішень, залишаються лише ті, які не мають домінуючих альтернатив. Це дозволяє зменшити кількість

можливих варіантів і зосередитися на ефективних рішеннях.

Другий етап. Науково обґрунтовуються додаткові критерії якості, які не входять до чинних стандартів, але є важливими для підвищення якості продукції. Ці критерії враховуються при порівнянні конкурентних варіантів і дозволяють знайти способи додаткової оптимізації.

Третій етап. Серед виділених ефективних рішень проводиться остаточний аналіз і обирається найкраще. На цьому етапі можуть враховуватися такі параметри, як ресурсозбереження чи екологічні аспекти технології. Остаточне рішення залишається за технологом, який враховує як формальні, так і неформальні критерії.

Цей підхід дозволяє ефективно вирішувати складні задачі, забезпечуючи оптимальне співвідношення між витратами та якістю, а також враховує сучасні вимоги до ресурсозбереження й екологічності.

4.2 Оцінка взаємозамінності пластифікаторів

Актуальною проблемою сучасного будівництва є розробка технологій, які одночасно сприяють економії ресурсів, зменшенню витрат паливно-сировинних матеріалів і підвищенню ефективності роботи підприємств. Нарівні з цим важливим завданням залишається створення екологічно безпечних будівельних матеріалів. Сучасні стяжкові суміші для підлог є складними багатокомпонентними системами, що складаються з різних матеріалів, кожен з яких відіграє свою функціональну роль.

На сьогоднішній день для отримання високоякісних будівельних сумішей активно застосовують різноманітні добавки, однак це суттєво впливає на їхню вартість і екологічні характеристики. Одним із перспективних шляхів створення екологічно безпечних матеріалів є використання інертних неорганічних добавок, які не мають токсичних чи небезпечних компонентів.

Основним аспектом будь-якої оптимізаційної задачі є поліпшення властивостей будівельних матеріалів, зменшення обсягу дорогих компонентів у складі сумішей і зниження загальної собівартості кінцевого продукту. Виробники прагнуть підвищити якість матеріалів, збільшуючи частку в'яжучих компонентів або додаючи складні й дорогі хімічні модифікатори, зокрема полімери. Проте кожен модифікатор має власний механізм дії, який може позитивно або негативно взаємодіяти з іншими компонентами суміші, викликаючи синергетичні або, навпаки, небажані ефекти.

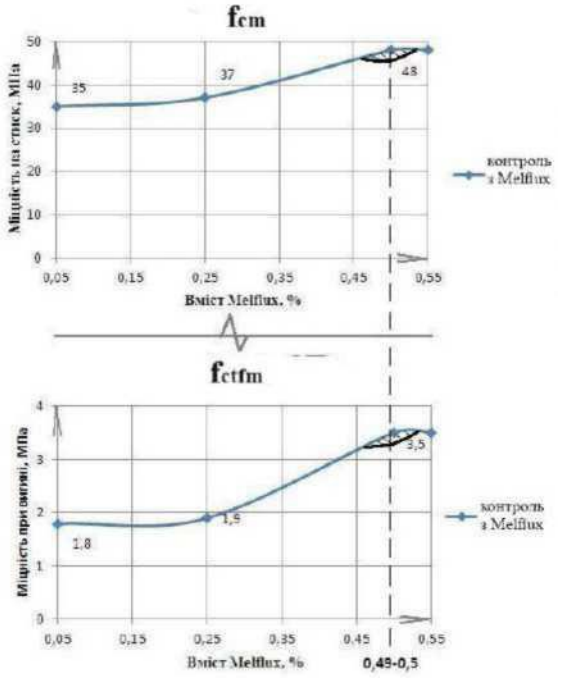


Рисунок 4.1 – Графік впливу різних доз суперпластифікатора Melflux на міцність на стиск і на розтяг при згині у віці 28 діб.

Нераціональне використання великої кількості добавок не лише збільшує собівартість матеріалів, але й часто погіршує їх експлуатаційні характеристики. Це особливо помітно на етапі тривалої експлуатації, коли взаємодія компонентів може знижувати міцність і довговічність матеріалів.

Пластифікатори, створені на основі полікарбоксилатних ефірів, сьогодні вважаються найефективнішими з точки зору пластифікуючого і водоредукуючого впливу. Технологія їх виробництва дозволяє розробляти

добавки, що поєднують високу збереженість рухливості сумішей із швидким набором міцності, що особливо важливо для сучасного будівництва, яке вимагає зменшення строків виконання робіт.

Сучасні суперпластифікатори, зокрема Melflux 2651 F, мають принципово інший механізм дії порівняно з нафталінсульфонатними добавками типу С-3. Якщо С-3 працює за рахунок електростатичного відштовхування зерен, то Melflux діє через стеричне (просторове) відштовхування, що забезпечується бічними ланцюгами макромолекул. Це дозволяє значно зменшити кількість води замішування і знизити вміст повітря в суміші, забезпечуючи високу рухливість.

Хоча суперпластифікатор Melflux є дорожчим, ніж С-3, його використання виправдане з екологічної та практичної точки зору. Він забезпечує більшу зручність транспортування сумішей завдяки уповільненню тужавлення. У той час як нафталінсульфонатні добавки більш універсальні та ефективно працюють у сфері залізобетонних виробів завдяки уповільнюючому ефекту, полікарбоксилатні суперпластифікатори пропонують нові можливості у виробництві, орієнтованому на високі екологічні стандарти.

Ціна Melflux 2651 F у вигляді сухої речовини становить 250 грн за 1 кг, тоді як суперпластифікатор С-3 коштує 60 грн за 1 кг. Але оптимальні дозування цих компонентів суттєво відрізняються: 0,45-0,5% для Melflux проти 1,5% для С-3. У підсумку, при раціональному використанні різниця у вартості кінцевого продукту мінімальна.

Експериментальні дані підтверджують, що рекомендовані виробником BASF дозування Melflux є оптимальними для цементних систем. З огляду на це, для раціонального використання ресурсів доцільно комбінувати суперпластифікатори у співвідношенні 2:1 (С-3:Melflux). Водночас, за рекомендацією Дворкіна Л.Й., оптимальним співвідношенням є 1:1, що дозволяє забезпечити баланс між ефективністю, економічністю і технологічністю матеріалів.

Результати досліджень показали, що використання суперпластифікаторів С-3 і Melflux 2651 F значно впливає на ключові фізико-механічні властивості

досліджуваних матеріалів. Залежно від складу і типу пластифікатора спостерігалися різні результати, які проілюстровані в порівняльних діаграмах (рис. 4.2-4.7).

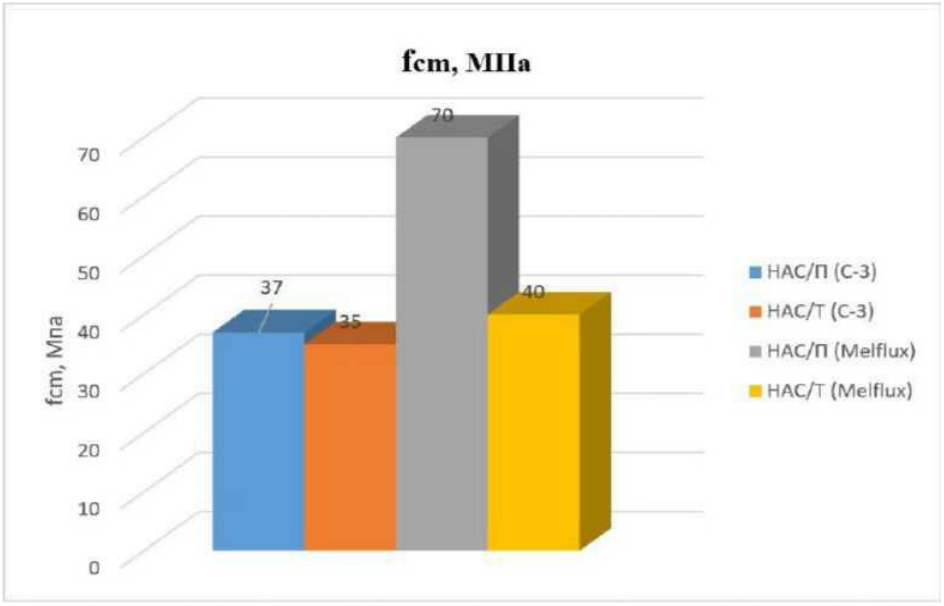


Рисунок 4.2 – Порівняльні діаграми впливу двох типів суперпластифікаторів з урахуванням інших компонентів суміші на ***fem***

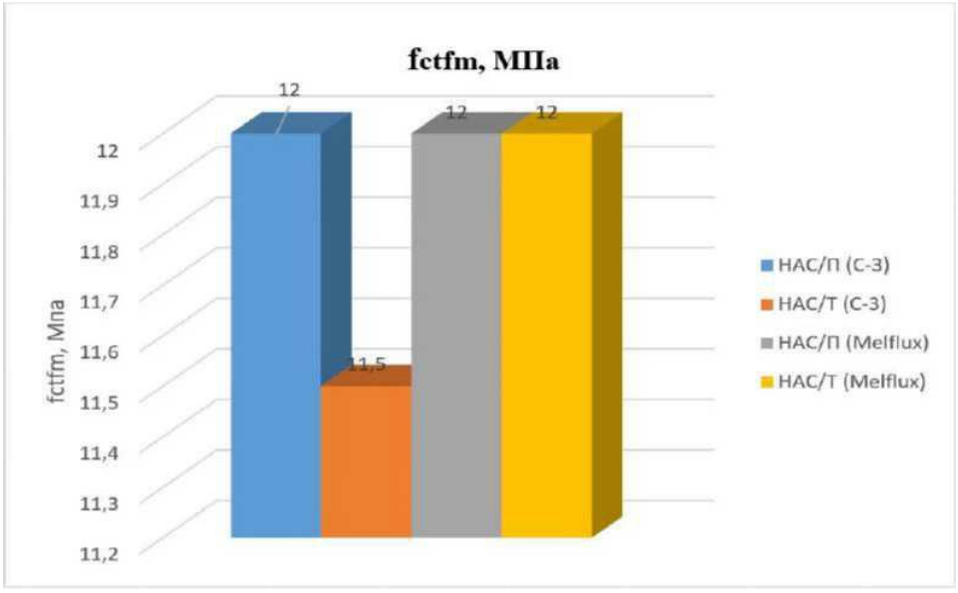


Рисунок 4.3 – Порівняльна діаграма впливу двох типів

суперпластифікаторів на ***fefm***

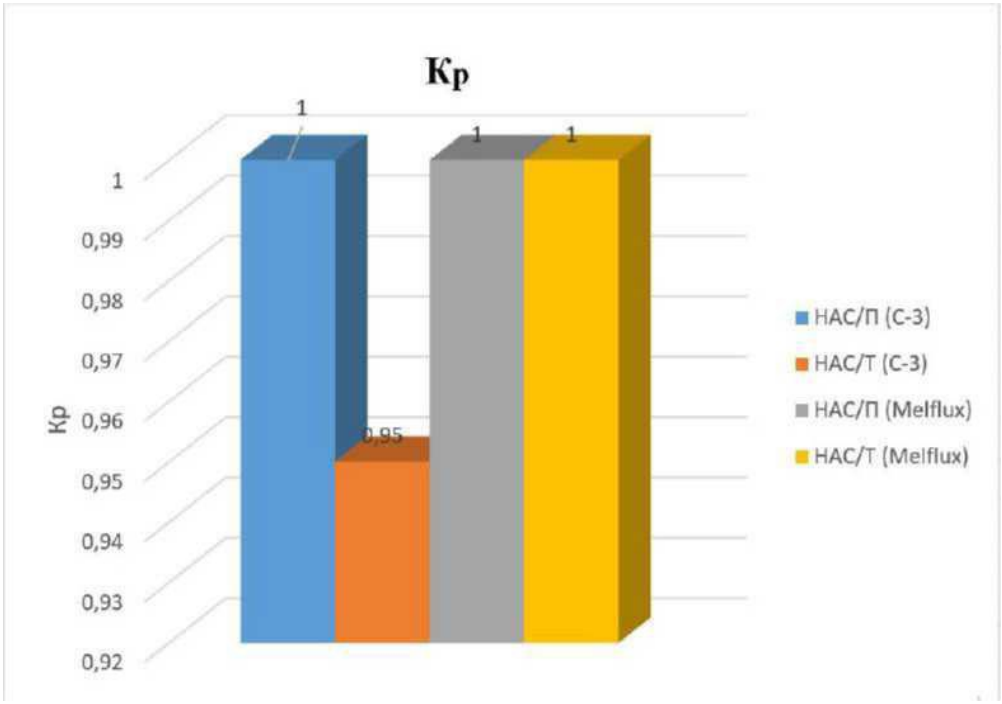


Рисунок 4.4 – Порівняльна діаграма впливу двох типів Суперпластифікаторів на ***Кр***

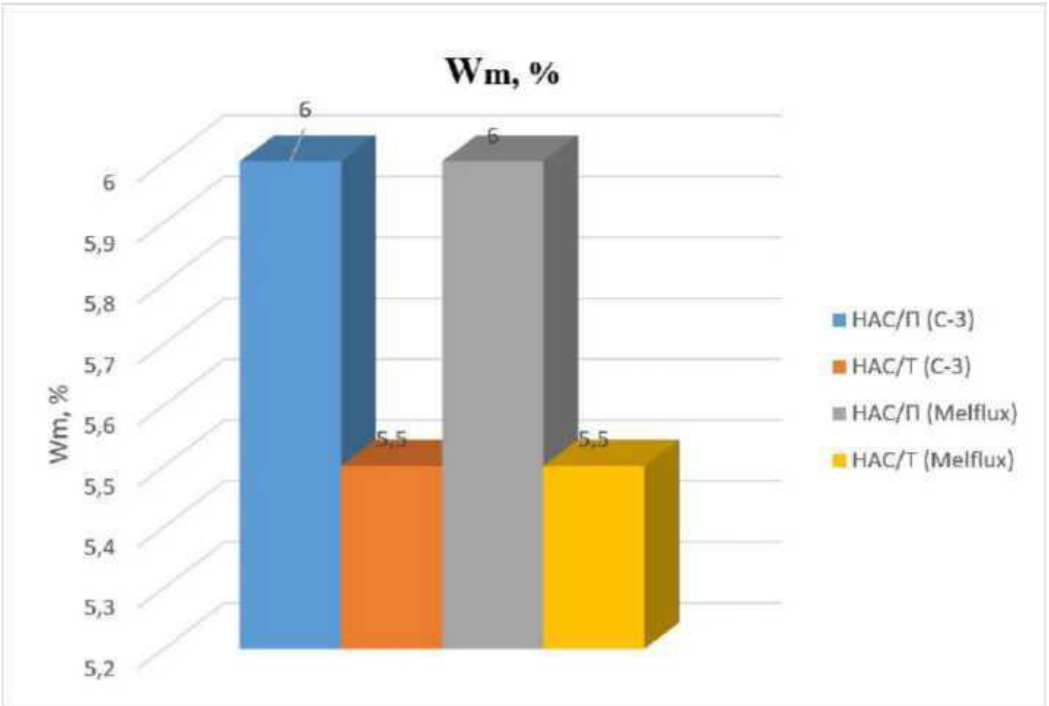


Рисунок 4.5 – Порівняльна діаграма впливу двох типів суперпластифікаторів на ***Wm***

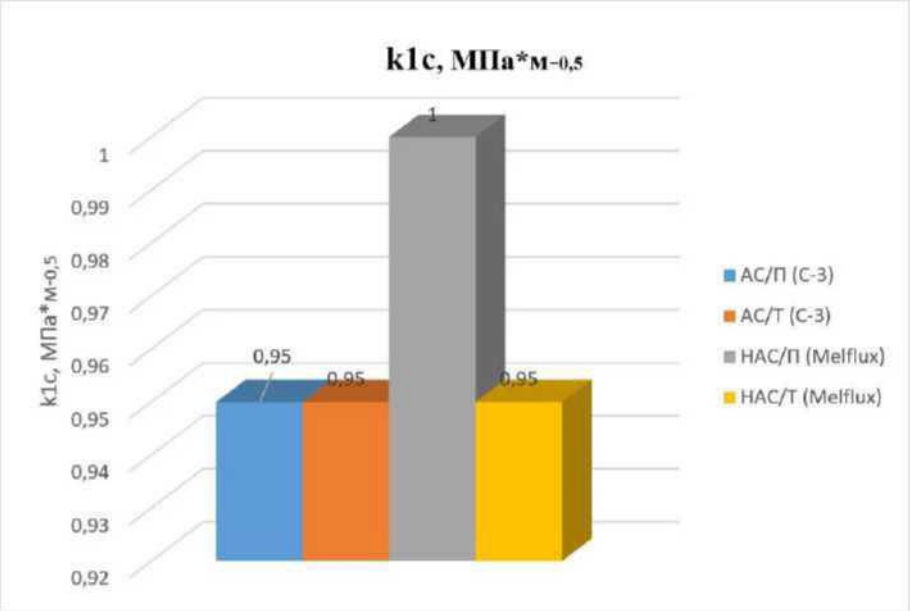


Рисунок 4.6 – Порівняльна діаграма впливу двох типів суперпластифікаторів на ***кіс***

Міцність на стиск: Дослідження показали, що максимальні значення міцності досягаються при використанні Melflux. Наприклад, для сумішей з неактивованим меленим піском fem досягла 70 МПа (М600, В50), тоді як із С-3 максимальне значення склало 37 МПа (М350). З меленим трепелом Melflux забезпечив 40 МПа, тоді як С-3 — лише 35 МПа (рис. 4.2).

Міцність на розтяг при згині: Вплив двох типів пластифікаторів на цей показник був мінімальним. У досліджуваних складах значення залишалися в межах 11-12 МПа незалежно від типу пластифікатора (рис. 4.3).

Водостійкість: Зміни водостійкості під впливом пластифікаторів не були суттєвими. Максимальні значення водостійкості досягалися при високому вмісті ВМК (10%), С-3 (1,5%), Melflux (0,05%) та середньому або високому вмісті ВЛ (5-10%) (рис. 4.4).

Коефіцієнт водопоглинання: Незалежно від типу пластифікатора,

коефіцієнт водопоглинання залишався стабільним і не перевищував 6% для всіх досліджуваних складів (рис. 4.5).



Рисунок 4.7 – Варіанти адгезії між основою і розчином з різними типами активних мінеральних наповнювачів

Коефіцієнт тріщиностійкості: Значення тріщиностійкості залишалися високими. Для складів із тонкомеленим трепелом коефіцієнт досягав 0,95 МПа·м^-0,5, а для складів із меленим піском і Melflux — 1 МПа·м^-0,5 (рис. 4.6).

Міцність зчеплення з основою (адгезія): Цей показник є критичним для промислових підлог. Дослідження показали, що комбінації з меленим трепелом, піском і відповідними добавками здатні забезпечити адгезію, яка відповідає вимогам ДСТУ для різних груп матеріалів. Ефективність адгезії підвищувалася завдяки використанню таких добавок, як ВМК і ВЛ, які забезпечували підвищену густину розчину і виключали водовідділення (рис. 4.7).

ВисновокПереваги Melflux очевидні у випадках, коли необхідно досягти максимальної міцності на стиск або підвищити тріщиностійкість. Однак, для зменшення собівартості в деяких випадках доцільно використовувати С-3, особливо в поєднанні з добавками, що оптимізують технологічні властивості суміші.

У цьому дослідженні проведено визначення міцності зчеплення (адгезії) з

використанням стандарту виробника адгезіометра DYNA Z 16 з цифровим монометром на 28 добу в нормальних умовах (рис. 4.8). Максимальне значення адгезії, рівне 1,9 МПа, отримане при відриві НАС/П від платформи НАС/П без використання ґрунту. Цей показник перевищує значення, нормовані по ДСТУ для різних видів розчинів, наприклад: для стяжок підлог (СТ1, СТ2, СТ3) адгезія перевищує норму у 5,5, 3 та 2 рази відповідно. Для покриттів підлог (ПО1, ПО2) адгезія перевищує норму в 1,1–1,4 рази, а для ремонтних складів (РМ3) – у 2,3 рази. Це демонструє високий рівень адгезії в порівнянні з нормованими показниками.

Таблиця 4.1 – Результати адгезії *fa* оптимальних складів на основі суперпластифікатора Melflux в різних варіантах зчеплення з різними типами наповнювачів

Найменування складу	Результати ***fa,*** МПа	
	з грунтом	без грунту
Контрольний	0,4-0,5	0,5
НАС/Т з НАС/Т	1,3^1,4	1>1,6
НАС/П з НАС/П	1>1,8	1,6^1,9
НАС/Т з НАС/П	0,8-0,9	1,1^1,2

Час життєздатності є важливим параметром, що визначає зручність роботи з розчиновими сумішами. За ДСТУ час життєздатності повинен становити не менше 20 хвилин. Проведені дослідження підтвердили, що за різних температур строк тужавлення розчину суттєво змінюється. При низьких температурах (-5 до +5°С) процес починається через 6-10 годин, а закінчується через 19-20 годин, тоді як у нормальних умовах (+20°С) період життєздатності складає 1-3 години. Використання суперпластифікаторів впливає на ці строки: наприклад, Melflux забезпечує стабільну рухливість суміші до 120 хвилин, а С-3 при дозуваннях

1,5% і більше значно подовжує час тужавлення, що знижує ефективність технологічного процесу.

Таблиця 4.2 – Порівняльні дані часу життєздатності активованих і неактивованих сумішей з різними суперпластифікаторами і прискорювачами тужавлення

Найменування складу	Назва досліджуваної добавки	Час життездатності суміши
Контроль	-	80-240 хв.
АС/Т	суперпластифікатор С-3	90-480 хв.
НАС/Т	суперпластифікатор С-3	90-600 хв.
АС/П	суперпластифікатор С-3	90-400 хв.
НАС/П	суперпластифікатор С-3	90-600 хв.
НАС/Т або НАС/П	суперпластифікатор Melflux	80-260 хв.
АС/Т	щавелева кислота	70-180 хв.
НАС/Т	щавелева кислота	60-200 хв.

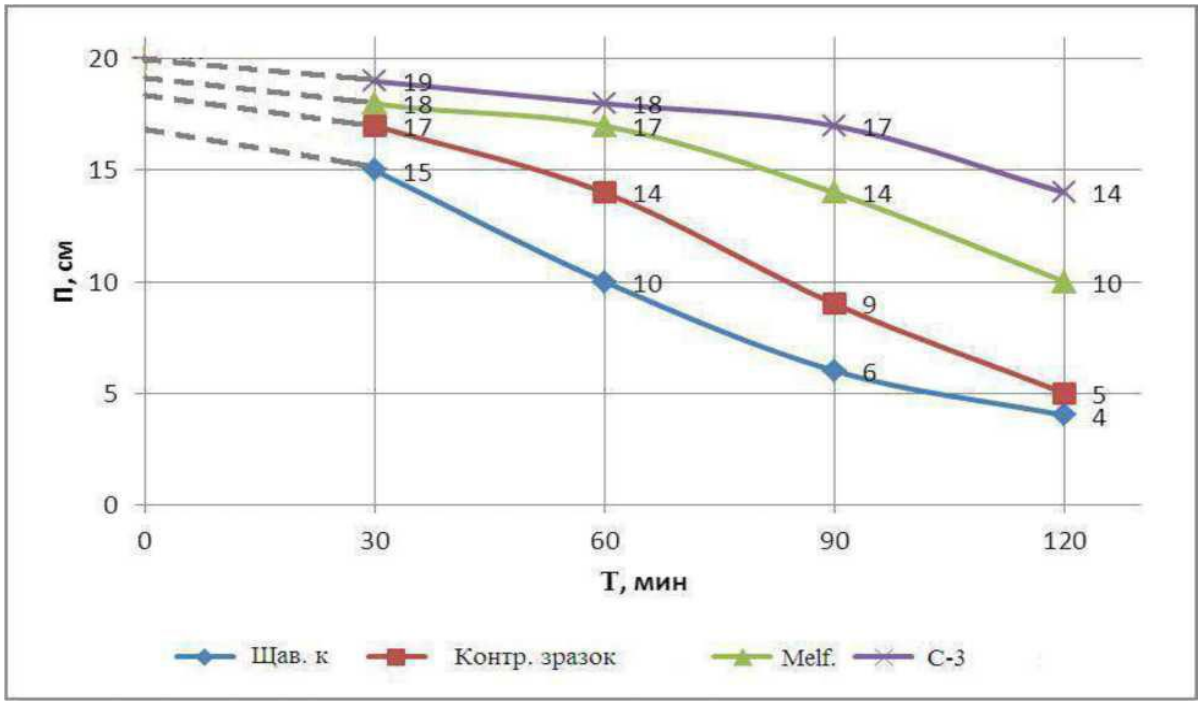


Рисунок 4.8 – Зміна рухливості розчинових сумішей в часі

Дослідження показали, що Melflux оптимально впливає на строки тужавлення: початок тужавлення відбувається раніше, а кінець — на годину пізніше еталонного складу. Це робить його зручним для роботи. У табл. 4.2 наведено дані найбільш оптимальних значень часу життєздатності сумішей.

У результаті експериментів встановлено, що використання Melflux дозволяє інтенсифікувати процеси тужавлення на 30%, збільшити міцність до 1,75 разу, а адгезію — до 2 разів у порівнянні зі С-3. Melflux показав найвищу ефективність у складах із тонкомеленим піском, тоді як у складах із трепелом розбіжності в міцності на стиск становили лише 2-4 МПа, а міцність на розтяг при згині залишалася практично однаковою.

4.3 Технологічний процес використання модифікованих сумішей для розчинів різних видів застосування

Аналіз сучасного українського ринку сухих будівельних сумішей демонструє значне зростання його обсягів із моменту становлення цієї галузі. У поточному році виробництво сухих будівельних сумішей в Україні досягло кількох мільйонів тонн, що свідчить про адаптацію ринку до сучасних вимог і запитів споживачів. На сьогодні вітчизняний ринок пропонує широкий вибір СБС, серед яких значну частку займають матеріали для облаштування підлог (рис. 4.13).

Згідно із загальними рекомендаціями виробників, до складу СБС для стяжок підлог і покриттів зазвичай входять фракціоновані піски, поліпропіленові або базальтові фіброволокна, наповнювачі розміром до 0,6 мм, стабілізуючі й водоутримувальні добавки, а також суперпластифікатори (рис. 4.14). Для різних видів покриттів також використовуються металеві та мінеральні зміцнювачі, спеціальні просочення. Витрата цементу на виготовлення 1 м³ бетону для стяжки підлоги становить 325–350 кг/м³.



Рисунок 4.13 – Обсяг українського ринку сухих будівельних сумішей

Конструкція підлог включає такі елементи, як покриття, прошарок, стяжка, гідроізоляція, підстильний шар, теплозвукоізоляційний шар, плита перекриття, а також елементи примикань, деформаційних швів, стічних лотків, каналів і трапів. Покриття є верхнім елементом підлоги, який піддається безпосередньому впливу експлуатаційних навантажень. Стяжка слугує вирівнювальним шаром, який укладається поверх плит перекриття.

Для стяжки марки СТ-1 оптимальна товщина становить 20–40 мм залежно від призначення. Для стяжки марки СТ-2 рекомендована товщина варіюється від 40 до 80 мм, а для СТ-3 — від 80 до 100 мм.

Згідно з різними рекомендаціями виробників, такими як BAUTECH Ukraine або Коутекстм, для промислових підлог висуваються підвищені вимоги до складу та властивостей розчинових сумішей. Наприклад, при замісі суміші водо-цементне (В/Ц) відношення не повинно перевищувати 0,5, марка стяжки має бути не нижче М200, міцність при згині повинна становити щонайменше 7, а бажано 10 МПа, а адгезія до основи повинна бути в межах 0,5–1,5 МПа залежно від конкретного призначення стяжки. Укладання підлог здійснюється пневматичною або тепловою вібраційною рейкою з подальшим механічним затиранням, нарізкою та заповненням усадочних швів.

Влаштування промислових підлог проводиться як при будівництві нових

споруд, так і при реконструкції існуючих об'єктів. До таких споруд належать цехи заводів і фабрик, транспортні стоянки, складські приміщення, механічні та інструментальні майстерні, торгові й виставкові зали тощо. Промислові підлоги зазнають значних експлуатаційних навантажень, характер яких залежить від функціонального призначення приміщення.

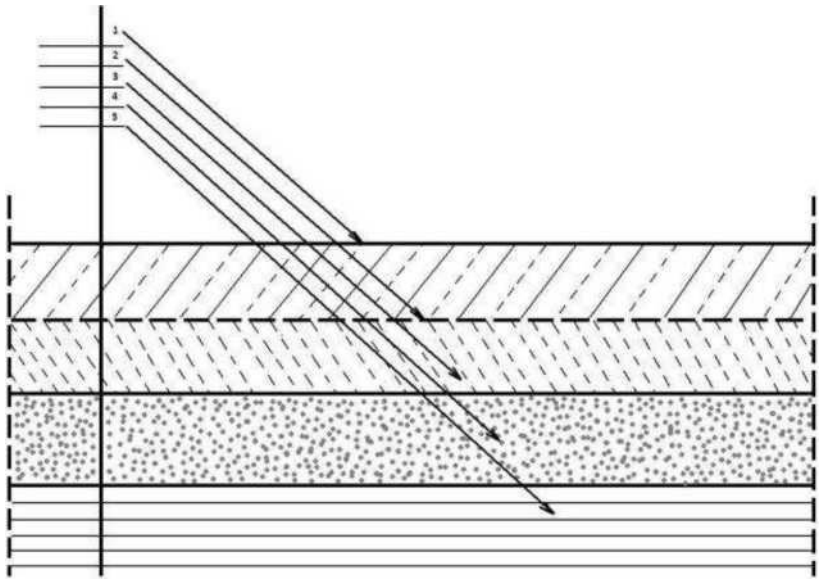


Рисунок 4.14 – Технологічна схема влаштування розчинових стяжок із зміцнюючим покриттям: 1 - стяжка із зміцнюючим покриттям, товщиною 40-80мм; 2 - поліетиленова плівка товщиною не менше 0,2 мм; 3 - низькомарочний бетон В.10 товщиною 100мм, 4 - нижній шар, відсів щебеню товщиною 200мм, 5 - основа, ущільнений грунт

Завантаження машини відбувається безперервно. Паралельно подається вода або розчин рідких добавок під тиском не нижче 0,15 МПа (рис. 4.14). Для готової розчинової суміші на основі тонкомеленого кварцового піску або трепелу В/Ц відношення не повинно перевищувати 0,5.

Основа під укладку верхнього шару розчинової суміші повинна бути підготовлена відповідно до проектного рішення, описаного в технічних картах, зображених на рис. 4.14.

Також, залежно від функціонального призначення підлогового покриття, може бути використана ефективна тепло-, паро- та звукоізоляція. У таких випадках ізоляційний шар розміщується безпосередньо під фінішною стяжкою. Схема пристрою для укладання стяжок і покриттів представлена на рис. 4.15. Машина для укладання забезпечує безперервне приготування розчину і його подачу гвинтовим насосом до місця укладання.

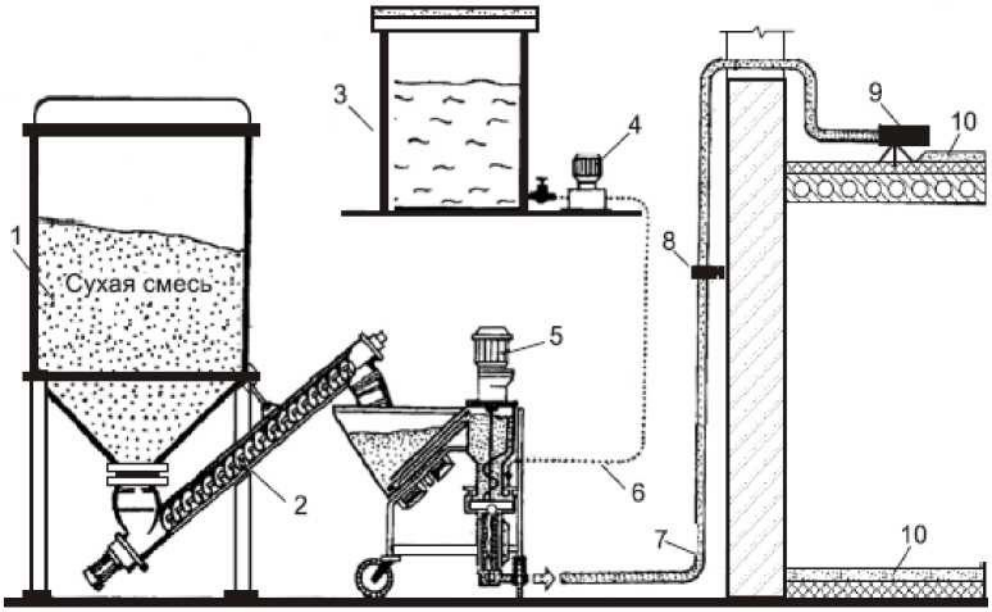


Рисунок 4.15 – Технологічна схема пристрою розчинових стяжок з використанням машини безперервної дії: 1 - бункер з сухою сумішшю; 2 - завантажувач; 3 - ємність для добавки і наповнювача; 4 - водяний насос К 20/18; 5 - машина Е-316А; 6 - водяний напірний шланг; 7 - розчиновід 2-секційний; 8 - швидкороз'ємне з'єднання; 9 - кінцевий гаситель; 10 -розчинова стяжка



Рис. 4.16 – Види бетонозмішувачей при виробництві робіт

Процес виготовлення і технологія укладання бетонної стяжки включають такі етапи:

- укладання суміші за допомогою правила або віброрейки;
- механічне затирання підлоги в кілька етапів;
- нанесення і розпорошення праймера або іншого просочення;
- нарізка усадкових швів;
- заповнення усадкових швів.

Ходити по стягуванню можна після досягнення ним міцності в 3 МПа, що зазвичай відбувається на другу або третю добу. Цементно-піщана стяжка вимагає систематичного догляду, включаючи полив водою, укриття плівками або покриття поверхні тирсою, які згодом прибираються. Використання стяжок дозволяє збільшити продуктивність праці одного робітника до 60 м² за зміну.

Технологічне обладнання для приготування дрібнозернистих сумішей має свої особливості. Автоматизація процесів зведення будинків і споруд із бетону та дрібнозернистого бетону на будівельному майданчику є актуальним сучасності. Такі роботи виконуються за допомогою технологічних комплексів або комплектів обладнання залежно від характеру будівництва — промислового або індивідуального. Сучасні бетонозмішувачі працюють у різних режимах, зокрема: тривальні бетонозмішувачі, змішувачі гравітаційно-примусової дії, традиційні бетонозмішувачі (300–900 об/хв), швидкісні змішувачі (до 2000 об/хв) та інші.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретично доведено можливість покращення якості цементних розчинів, які застосовуються для улаштування підлогових елементів та відновлення пошкоджених ділянок розчинових поверхонь. Це досягається шляхом модифікації складів за допомогою комплексу полідисперсних кремнеземовмісних наповнювачів, що мають різний генезис і структуру.

2. Проаналізовано вплив полідисперсних кремнеземовмісних наповнювачів і суперпластифікатора С-3 на властивості модифікованих сумішей. Встановлено, що активація сумішей підвищує їх рухливість у два рази для трепелу і в 1,5 раза для піску. Додавання трепелу до неактивованих сумішей значно знижує показник розчиновідділення — до чотирьох разів порівняно з нормою і в 1,2 раза порівняно з неактивованими сумішами на основі тонкомеленого піску. Розшаровуваність активованих і неактивованих сумішей регулюється питомою поверхнею (Snum) наповнювачів.

3. Оптимізовано склади поліфункціональних модифікаторів, які сприяють покращенню якості цементно-піщаних розчинів різного призначення. Оптимізація базується на використанні комплексу полідисперсних кремнеземовмісних наповнювачів різного генезису і структури та суперпластифікаторів. Поліфункціональні модифікатори відрізняються типом суперпластифікатора і включають до складу тонкомелений трепел або тонкомелений кварцовий пісок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Саницький М.А. Фізико-хімічні основи формування структури цементного каменю. Львів: Вища школа, 1981. С.15-21.

2. Саницький М.А. Модифіковані цементи для бетонів та будівельних розчинів. *Зб. наук. праць: Будівельні конструкції',* 2002, Вип. 56. С.378-385.

3. Sopov V.P. High-mobility concrete mixes for concrete-filled steel tube structures of complex cross-section | Sopov V.P., Dolgiy V.P., Latorets K.V., Zhuravlov Yu.V. // *International Journal of Engineering and Technology,* 2018. No.7 pp. 295-300.

4. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 31с.

5. ДСТУ Б.В.2.7-46:2010. Цементи загально будівельного призначення. Технічні умови. Мінрегіонбуд України, 2011. 20с.

6. Pane I. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. 2005. pp. 1155-1164.

7. Chung D. D. L. Review Improving cement-based materials by using silica fume / D. D. L. Chung // *Journal of Materials Science*. 2002. Vol. 37. pp. 673-682.

8. Рунова Р.Ф. Модифицированные бетоны для специального строительства / Р.Ф. Рунова., Г.Б. Гиршгель., С.В. Глазкова., И.О. Кириченко // *Строительные конструкции: Межведомственный научно-технический сборник.К.: ДНДІБК*, 2004. Вып. 60. С. 582-584.

9. Урханова, Л.А. Бетон підвищеної міцності на композиційному в'яжучому / Л.А. Урханова, С.А. Лхасаранов, С.П. Бардаханов // *Будівельні матеріали*. 2012. № 3. С. 23-25.

10. Лесовик В.С. Использование природного перлита в составах смешанных цементов / В.С. Лесовик, Ф.Е. Жернова, Е.С. Глаголив // *Строительные материалы*. 2009. № 6. С. 84-87.

11. Тертичний А.А., Тимняк А.Б., Лінник Д.С. Оптимізація складів сухих будівельних сумішей на основі експериментально-статистичних моделей. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка: науково - технічний збірник.* Київ, 2013. №48. С. 179-183.

12. Луцкін Є.С., Шинкевич О.С., Тертичний А.А. Розробка енергоефективних складів для омонолічування конструкцій. *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво).* №80. К:ДП НДІБК. 2014. С. 214-217.

13. Тертичний А.А., Тимняк А.Б., Корчажнікова О.І., Шинкевич О.С., Мироненко І.М Вплив органо-мінерального комплексу на властивості активованого дрібнозернистого бетону. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. №56. С. 215-220.

14. Shinkevich E.S., Mironenko T.M., Tertychny A.A. Assessment of the effectiveness of activation of fine grain mixtures and concretes modified with organic mineral fillers. *Materials of the XIII international scientific and practical conference «Fundamental and applied science». Sheffield, Science and education* LTD, 2017. pp. 43-45.

15. Шинкевич Е.С. Луцкин Е.С., Тертычный А.А.Многофункциональность влияния кремнеземсодержащего компонента на структуру и свойства строительных композитов. *Тезисы докладов 6-й международной научно-технической конференции «Проблемы надёжности и долговечности инженерных сооружений и строений на железнодорожном транспорте».* Харьков: УкрДЗУТ. 2017 - С. 38-39.

16. Солодкий С.Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах. Львів: *Видавництво Національного університету «Львівська політехніка»,* 2008. 144 с.

17. Дворкін Л.І. Проектування складів бетонів. *Монографія. Рівне: НУВГП*, 2015. 353с.