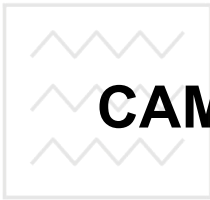




Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування

Л.Й. Дворкін, О.М. Бордюженко



ЕФЕКТИВНІ САМОУЩІЛЬНЮВАНІ БЕТОНИ

Монографія

Рівне 2021



Рецензенти:

Саницький М. А., д.т.н., професор Національного університету «Львівська політехніка»;

Кузло М. Т., д.т.н., професор Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне.

*Рекомендовано науково-технічною радою Національного університету водного господарства та природокористування.
Протокол № 137 від 14 грудня 2020 р.*

Дворкін Л. Й., Бордюженко О. М.

Д24 Ефективні самоущільнювані бетони : монографія. – Рівне : НУВГП, 2021. – 169 с.

ISBN 978-966-327-488-1

У монографії наводяться результати досліджень авторів технологічних особливостей самоущільнюваних, малоцементних, цементно-полімерних бетонів при введенні до складу сумішей золи-виносу в композиції з суперпластифікаторами, полімерними та іншими добавками.

Запропонований комплекс експериментально-статистичних моделей, що дозволяють виконувати багатопланову кількісну оцінку впливу технологічних факторів і їх взаємодій на властивості матеріалів та знаходити оптимальні рішення.

УДК 691.32

ISBN 978-966-327-488-1

© Л. Й. Дворкін,
О. М. Бордюженко, 2021
© НУВГП, 2021



ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
РОЗДІЛ I. СТАН ПРОБЛЕМИ. ОГЛЯД ОСНОВНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	7
1.1. Склад, структура і властивості самоущільнюваних бетонних сумішей і бетонів.....	8
1.2. Особливості використання суперпластифікаторів для отримання самоущільнюваних бетонів.....	18
1.3. Мінеральні добавки і наповнювачі в складах самоущільнюваних бетонів.....	24
1.4. Актуальність, мета та задачі досліджень.....	30
РОЗДІЛ II. САМОУЩІЛЬНЮВАНІ ЗОЛОВМІСНІ БЕТОНИ	32
2.1. Властивості цементно-зольного тіста та бетонних сумішей.....	32
2.2. Міцнісні властивості золівмісних СУБ.....	45
2.3. Властивості, що характеризують довговічність СУБ.....	56
РОЗДІЛ III. КОМПОЗИЦІЙНІ МАЛОЦЕМЕНТНІ САМОУЩІЛЬНЮВАНІ БЕТОНИ	66
3.1. Основні напрямки отримання малоцементних композиційних бетонів. Активація наповнювачів.....	66
3.2. Властивості бетонних сумішей з золо-метакаоліновим наповнювачем.....	74
3.3. Фізико-механічні властивості бетону з золо-метакаоліновим наповнювачем.....	84
РОЗДІЛ IV. САМОУЩІЛЬНЮВАНІ БЕТОНИ З ДОБАВКАМИ ПОЛІМЕРІВ	94
4.1. Модифікування цементних бетонів полімерними добавками.....	94
4.2. Властивості самоущільнюваних дрібнозернистих бетонних сумішей із добавками полімерів.....	96
4.3. Вплив складу поліфункціонального модифікатора на основні властивості СУБ.....	107
РОЗДІЛ V. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ САМОУЩІЛЬНЮВАНИХ БЕТОНІВ	122
5.1. Основні вимоги до самоущільнюваних бетонних сумішей та методи випробувань.....	122



5.2. Склад самоущільнюваних бетонних сумішей і вимоги до вихідних матеріалів	130
5.3. Загальні принципи підбору складу самоущільнюваного бетону та приготування суміші	135
5.4. Розрахунок складу СУБ	139
5.5. Дослідно-промисловий випуск самоущільнюваних бетонів та фібробетонів	144
Загальні висновки.....	150
Перелік літератури	154





ПЕРЕДМОВА

Сучасне монолітне будівництво характеризується широким застосуванням високотехнологічних бетонних сумішей, що здатні без використання зовнішніх механічних впливів заповнювати опалубку або форму, в тому числі складної конфігурації, густоармовану, зберігаючи при цьому зв'язність і однорідність – самоущільнювальні бетони (СУБ, SCC – Self-Compacting Concretes).

Поряд з високою легкоукладальністю такі бетони характеризуються швидкими темпами набору міцності, високими фізико-механічними характеристиками, що дозволяє віднести їх до класу "високофункціональних бетонів" (High Performance Concretes). Це забезпечується за рахунок застосування комплексних модифікаторів, що включають, як правило, ефективні суперпластифікатори, модифікатори в'язкості, активні мінеральні добавки (наповнювачі), прискорювачі твердіння.

До теперішнього часу результати численних досліджень і багатий практичний досвід переконливо показує, що введення кам'яновугільної золи-виносу в якості активного дисперсного наповнювача в цементні бетони і розчини є одним з ефективних напрямків зниження витрати цементу і поліпшення ряду будівельно-технічних властивостей композиційних матеріалів на його основі. Як показують результати досліджень останніх років, потенціал золи як активного наповнювача бетонів і розчинів реалізується значно повніше в композиції з суперпластифікаторами та іншими модифікуючими добавками.

У монографії наводяться результати досліджень авторів технологічних особливостей самоущільнюваних, малоцементних, цементно-полімерних бетонів при введенні до складу сумішей золи-виносу в композиції з суперпластифікаторами, полімерними та іншими добавками. Розглянуто ефективність активізації золи як наповнювача СУБ при підвищенні її дисперсності шляхом домелу, а також в комбінації з метакаоліном.

Основне місце в монографії відводиться результатами



досліджень, спрямованих на аналіз закономірностей формування властивостей ефективних золосомісних СУБ з добавками поліфункціональних модифікаторів.

Особливістю виконаних досліджень є широке використання методів математичного планування експериментів і на їх основі отримання великого комплексу експериментально-статистичних моделей, що дозволяють виконати багатопланову кількісну оцінку впливу технологічних факторів і їх взаємодій на властивості матеріалів, і знайти оптимальні рішення.

Автори сподіваються, що монографія сприятиме розширенню масштабів використання зольних відходів теплових електростанцій в будівництві, виробництва на їх основі ефективних бетонів і розчинів, що характеризуються раціональним використанням портландцементу як одного з найбільш дорогих і енергоємних ресурсів, і в той же час високими експлуатаційними властивостями.





РОЗДІЛ I

СТАН ПРОБЛЕМИ. ОГЛЯД ОСНОВНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В сучасному монолітному будівництві все ширше застосовуються високотехнологічні бетонні суміші, здатні без застосування будь-якого зовнішнього механічного впливу заповнювати опалубку (форму), в тому числі густоармовану, зі складною геометрією, зберігаючи при цьому зв'язність і однорідність – самоущільнювальні бетони (СУБ). Поряд з високою легкоукладальністю такі бетони характеризуються швидкими темпами набору міцності, високими фізико-механічними характеристиками, що дозволяє віднести їх до класу «високофункціональних бетонів» (High Performance Concretes). Це забезпечується за рахунок застосування комплексних модифікаторів, що включають, як правило, ефективні суперпластифікатори, модифікатори в'язкості, активні мінеральні добавки (наповнювачі), прискорювачі твердіння. При цьому, застосування таких добавок як полікарбоксилатні суперпластифікатори, мікрокремнезем, метаколін, можуть призводити до значного зростання вартості самоущільнюваних бетонів у порівнянні зі звичайними. Проте, з іншого боку, використання СУБ дозволяє зменшити затрати за рахунок полегшення умов укладання високорухливої суміші, скорочення термінів будівництва, а також за рахунок можливості зменшення витрат цементу – одного із найбільш енергозатратних промислових продуктів, внаслідок хіміко-мінералогічного модифікування бетонної суміші.

Одержання високоякісного самоущільнювального бетону, що характеризується підвищеною легкоукладальністю, високою марочною міцністю, водонепроникністю, корозійною стійкістю, низькими показниками усадки, вимагає дослідження впливу хімічних та мінеральних добавок на формування його структури.



1.1. Склад, структура і властивості самоущільнюваних бетонних сумішей і бетонів

На розвиток і вдосконалення технологічного процесу виробництва бетонних сумішей, формування з них залізобетонних конструкцій впливають два ключові чинники: з одного боку, отримання міцного і довговічного бетону, з іншого - зниження трудових і енергетичних витрат при його виробництві. Протягом тривалого періоду ці два фактора залишались суперечливими, оскільки для отримання високоміцних, довговічних бетонів їх склади проектували з низьким значенням водоцементного відношення, що обумовлює отримання жорстких бетонних сумішей, які потребують підвищених енергетичних витрат як при перемішуванні, так і при укладанні і вібраційному ущільненні в формах. Останнє істотно підвищує трудомісткість технологічного процесу. У той же час, можливість отримання високорухливих бетонних сумішей забезпечувалася, в основному, за рахунок збільшення витрати води замішування що, в свою чергу призводить, до зниження міцності і довговічності бетону.

Ці протиріччя значною мірою були вирішені з розробкою ефективних пластифікаторів і суперпластифікаторів в середині 70-х років минулого століття. Їх застосування в складах бетону забезпечило можливість отримання високорухливих (литих) бетонних сумішей і бетонів з високими фізико-механічними і експлуатаційними характеристиками на рядових портландцементних і заповнювачах за рахунок двох основних ефектів: пластифікуючого і водоредукуючого [71; 97]. У той же час, поряд з очевидними перевагами в практиці отримання високорухливих бетонних сумішей мали місце і ряд недоліків. Так, більшість суперпластифікаторів сповільнювали тужавлення і твердіння бетонної суміші, особливо при високих вмістах. Найчастіше суперпластифікатори першого-другого покоління не забезпечували необхідну збережуваність рухомості бетонних сумішей при транспортуванні до місця формування протягом 60...90 хвилин. При прокачуванні бетонних сумішей бетононасосами до місця укладання на відстань понад 200-250 м



мали місце випадки їх розшарування, що створювало неоднорідності в будівельних конструкціях. З цієї точки зору гранулометричний склад мінеральної частини бетонів повинен задовольняти вимогам до перекачуваних бетонних сумішей [125]. Згідно [71] при деформації бетонної суміші щільної структури, що створюється неперервною гранулометриєю заповнювачів, її частинки здатні «перекочуватися» одна по іншій, і при цьому не застрягає в пустотах.

У той же час, вирішальну роль в розвиток технології високорухливих бетонних сумішей зіграли сформовані в результаті багатьох досліджень і підтверджені практикою наукові основи модифікування бетонів поліфункціональними добавками-модифікаторами [48; 68]. З появою суперпластифікаторів третього покоління, застосуванням вискодисперсних кремнеземомістких матеріалів техногенного походження, перш за все мікрокремнезему, в технології бетону стався потужний якісний стрибок. Оптимальне поєднання зазначених добавок-модифікаторів, а при необхідності суміщення з ними інших органічних і мінеральних матеріалів, дозволяє направлено керувати реологічними властивостями бетонних сумішей, модифікувати структуру цементного каменю на мікрорівні таким чином, щоб надати властивостей, які забезпечують високу експлуатаційну надійність бетонних конструкцій [97; 134].

Реалізація в світовій практиці унікальних проєктів (протяжні підвісні мости в Японії і Китаї, комплекси великих гідротехнічних і транспортних споруд в Нідерландах, бурові платформи в Норвегії, висотні будівлі і споруди в різних країнах) зумовила підвищення вимог до бетонів і бетонних сумішей: застосування литих сумішей у великому обсязі, забезпечення стійкості до розшарування в процесі їх транспортування на великі відстані і формування, прискорений набір міцності в ранні строки твердіння.

В результаті проведених науково-дослідних робіт вченими Токійського університету [39; 40] в кінці 80-х років минулого століття був розроблений склад бетону, який був настільки плинним, що не вимагав вібраційного ущільнення –



самоущільнюваний бетон (SCC – self – compacting concrete). На початку 90-х такі бетони виробляли під такими торговими марками, як NVC (non – vibrated concrete) – Kajima Co., SQC (super quality concrete) – Maeda Co., The Biocrete of Taisei Co [4].

Створення самоущільнюваного бетону, перш за все, пов'язано з розробкою японськими вченими [2; 38] і впровадженням в практику нового покоління суперпластифікаторів на основі поліакрилатів і полікарбоксилатів. Значний внесок у розвиток суперпластифікаторів нового покоління (MAPE I) і бетонів на їх основі зробили італійські вчені наукової школи Маріо Коллепарді [12; 44].

Перша міжнародна конференція з вивчення властивостей самоущільнюваного бетону пройшла в 1998 році за участю 150 вчених і інженерів з 15 країн. Висока ефективність нового матеріалу сприяла створенню робочої групи фахівців RILEM (1996 р.) з восьми країн для розробки рекомендацій щодо використання самоущільнюваних бетонів. У 2004 році був організований технічний комітет 205-DSC «Довговічність самоущільнюваного бетону». У роботі цього комітету задіяні 25 лабораторій з 14 країн.

Під самоущільнюваними розуміють бетонні суміші, здатні укладатися в форму чи опалубку без вібрації, під впливом власної ваги, рівномірно розподілятися по усьому об'ємі при збереженні однорідності навіть при наявності густо розташованої арматури, а також самостійно звільнятися від повітря, що в ньому міститься [12; 40; 54; 73; 138]. Визначальними особливостями таких сумішей є їх висока легкоукладальність, що поєднує дві протилежні за своєю природою характеристики: низьке граничне напруження зсуву, що зумовлює високу плинність суміші, і підвищену в'язкість, яка забезпечує стабільність і зв'язність суміші. Згідно даним [56] максимальне напруження зсуву СУБ (менше 60 Па) є значно меншим, ніж у звичайного бетону (100-1000 Па), в той же час пластична в'язкість практично однакова (20-200 Па·с). Вирішення цієї компромісної задачі забезпечує:

– заповнюючу здатність (filling ability) – здатність СУБ при



необмеженій плинності повністю заповнювати всі порожнини в опалубці під дією власної ваги;

- здатність до подолання перешкод (passing ability) – здатність СУБ долати перешкоди у вигляді вузьких перерізів опалубки і формувальної оснастки, проміжки між стержнями арматури без розшарування або блокування крупного заповнювача;
- опір сегрегації (resistance to segregation) – здатність СУБ залишатися однорідною за складом без розшарування при транспортуванні і формуванні.

Здатність заповнення забезпечується підвищеною деформацією цементної пасти, що досягається застосуванням ефективних суперпластифікаторів, оптимальним водо-в'язучим відношенням, використанням мінеральних добавок (наповнювачів) з безперервною гранулометриєю [4; 12; 13; 40; 50; 54]. При цьому дисперсні частинки розміром менше 90 мкм в кількості 500...600 кг/м³ забезпечують стійкість бетонної суміші до розшарування [4; 40; 54].

Для підвищення здатності бетонної суміші долати перешкоди необхідно, перш за все, оптимізувати гранулометричний склад заповнювачів, зменшити витрату крупного і збільшити відповідно витрати дрібного заповнювача, обмежити максимальний розмір зерен крупного заповнювача і збільшити вміст цементної пасти, забезпечуючи тим самим обмазку зерен для зниження тертя [4; 36; 40; 54; 71; 73; 125].

Залежно від призначення та області застосування прийнята наступна класифікація самоущільнюваних бетонних сумішей (табл. 1.1) [54].

В даний час, виходячи з перерахованих вище основних характеристик СУБ і вимог щодо їх забезпечення, бетони класифікують за трьома типами [24]:

- 1) порошкового типу – суміші з низьким водо-в'язучим відношенням і високим вмістом дисперсних матеріалів для підвищення пластичної в'язкості;
- 2) бетони з модифікаторами в'язкості – в порівнянні з першим типом потребують більшої витрати суперпластифікаторів, більш високого значення водо-в'язучого відношення для забезпечення вимог по заповнювальній (проникаючій) здатності. Можливі



проблеми несумісності модифікаторів в'язкості із суперпластифікаторами;

3) комбінованого типу – бетони порошкового типу з невеликою добавкою модифікатора в'язкості.

Таблиця 1.1

Класифікація бетонних сумішей для виробництва
самоущільнюваних бетонів

Найменування бетонної суміші	Позначення	Призначення і область застосування самоущільнюваних бетонів
Текуча (Flowability Slump-flow)	SF1 (550-650 мм)	Неармовані або малоармовані бетонні конструкції – плити перекриттів, трубопроводи, облицювання тунелів, фундаментів.
	SF2 (660-750 мм)	Більшість звичайних споруд – колони, стіни.
	SF3 (760-850 мм)	Вертикальні елементи, густоармовані конструкції складних форм, торкретування.
В'язка (Viscosity)	VS 1 / VF 1 (В'язкість менше 8 секунд)	Конструкції і виробі, до яких висуваються високі вимоги за якістю поверхні і що не потребують додаткової обробки.



продовження табл. 1.1

	VS2 / VF2 (в'язкість 9-25 секунд)	Конструкції невисокого класу по міцності. Внаслідок підвищеної розша- ркованості тиксо- тропні властивості швидко змінюються за невеликий проміжок часу, що обмежує відстань транспор- тування
Проникна (Passing ability) 	PA 1	Вертикальні споруди, житлове будівництво, конструкції, армовані з кроком від 80 до 100 мм.
	PA 2	Інженерні споруди, армовані з кроком від 60 до 80 мм.
Стійка до розшарування (Segregation resistance)	SR1 (Розшаровуваність не більше 20%)	Висотні елементи, за винятком тонких балок, вертикальні споруди, армовані з кроком до 80 мм. Максимальна відстань транспортування менше 5 метрів.
	SR2 (Розшаровуваність не більше 15%)	Стіни і тонкостінні профілі, армовані з кроком понад 80 мм. Максимальна відстань транспортування більше 5 метрів.



Основні компоненти самоущільнюваного бетону ті ж, що й використовуються при виробництві звичайного бетону. Відмінність полягає лише в їх співвідношенні, а також у використанні спеціальних добавок, які, власне, і надають бетону здатність до самоущільнення. У той же час, для досягнення високих технологічних і експлуатаційних характеристик самоущільнюваних бетонів висуваються більш жорсткі вимоги до сировинних матеріалів.

Відповідно до рекомендацій Європейської федерації фахівців з будівельної хімії та бетону (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) [54] при проектуванні складу бетону більш доцільно виражати співвідношення вихідних компонентів не за масою, а за об'ємом. На першому етапі встановлюються співвідношення між компонентами на основі типових діапазонів їх вмісту, що забезпечують нормовані показники самоущільнюваної бетонної суміші:

- об'ємне співвідношення вода / дисперсний матеріал (цемент, мінеральна добавка, фракції піску дрібніше 0,125 мм) – від 0,80 до 1,10;
- загальний вміст дисперсних матеріалів – від 160 до 240 літрів (400-600 кг на кубічний метр);
- вміст цементу – 350-450 кг/м³ (витрата цементу понад 500 кг/м³ може збільшити усадку і повзучість бетону; витрата менше 350 кг/м³ може бути допустимою тільки при використанні інших дрібнодисперсних мінеральних наповнювачів або пуцоланових добавок);
- вміст крупного заповнювача – від 28 до 35% по об'єму бетонної суміші;
- водо-цементне відношення призначається виходячи з вимог EN 206-1 (зазвичай вміст води не перевищує 200 л/м³).

Професор Х. Окамура [39; 40] запропонував метод проектування самоущільнюваного бетону, основна ідея якого полягає в тому, що на першому етапі випробовуються цементна паста і розчин з метою визначення сумісності суперпластифікатора, цементу, дрібного заповнювача і пуцоланової добавки, а на другому етапі випробовується



пробний заміс СУБ. Перевагою цього методу є те, що він дозволяє уникнути повторення подібних трудомістких випробувань для всієї бетонної суміші. Однак, серед недоліків методу слід зазначити, перш за все, що далеко не всі заводи товарного бетону оснащені необхідним обладнанням для дослідження реології цементних паст і розчинів, зокрема ротаційними віскозиметрами. З іншого боку, професором Г.В. Несветаєвим [124] запропонована досить проста методика оцінки реологічних характеристик цементної пасту: залежності граничного напруження зсуву цементного тесту від виду і дозування добавки для цементу певного хіміко-мінералогічного складу. Наприклад, для отримання самоущільнюваних сумішей класу SF 1 значення граничної напруги зсуву орієнтовно має становити не більше 10, а сумішей класу SF 2 – не більше 8.

Тайванськими вченими [51] запропонована спрощена методика проектування складу СУБ, основою якої є умова досягнення максимального коефіцієнта упаковки крупного і дрібного заповнювача – (packing factor PF). Міцність СУБ забезпечується каркасом заповнювачів, склеєних цементною пастою в затверділому стані, в той час як технологічні властивості сумішей забезпечуються цементною пастою в свіжоприготовленому стані. Очевидно, що коефіцієнт упаковки PF впливає на вміст наповнювачів в СУБ. Більш високе значення PF обумовлює більш високий вміст крупного та дрібного заповнювачів, зменшуючи кількість в'язучої речовини. Відповідно, легкоукладальність суміші, її здатність до самоущільнення, а також міцність бетону при стиску будуть зменшуватися. З іншого боку, низьке значення PF обумовлює підвищену усадку бетону. Підвищений вміст в'язкої пасту також впливає на довговічність СУБ і істотно збільшує його собівартість. За даними [101] вартість 1 м³ традиційного бетону складає близько \$50. В той час як для литої і самоущільнюваної бетонної суміші вартість становить відповідно \$69 і \$136. У зв'язку з цим при проектуванні складу суміші важливо вибрати таке оптимальне значення PF, яке б забезпечувало як вимоги до властивостей СУБ, так і економічні чинники.

На підставі даних, викладених в [66], в табл. 1.2 наведено



склади самоущільнюваних бетонів, що застосовуються в різних країнах світу.

Таблиця 1.2

Усереднені склади самоущільнюваних бетонів

Компоненти бетонної суміші	Усереднена витрата на 1 м ³ бетонної суміші в різних країнах			
	Японія	США	Країни ЄС	Індія
Вода, л	175	180	190	163
Портландцемент, кг	530	357	280	330
Мінеральна добавка, кг	70 (низько кальцієва зола)	119 (доменний граншлак)	245 (мелений вапняк)	150 (високо-кальцієва зола)
Дрібний заповнювач, кг	751	936	865	309
Крупний заповнювач, кг	789	684	750	455
Добавка суперпластифікатора, до г (л)	9	2,5	4,2	0,92

При створенні високоміцних самоущільнюваних бетонів в тому числі, реакційно-порошкових, додаючи в якості структурних компонентів суперпластифікатори і гіперпластифікатори, мікро- і нанокремнеземи, кам'яне борошно або золу, вдалося підвищити рівень міцності бетонів на стиск до 130...150 МПа, а в деяких випадках і до 180...200 МПа без додаткової теплової обробки. Однак і бетони старого покоління, модифіковані високоефективними суперпластифікаторами і тонкодисперсними реакційно-хімічними добавками, відрізняються підвищеними показниками міцності, але при значно більших витратах цементу [96].



Таким чином, самоущільнювані бетони володіють комплексом властивостей, що дозволяє віднести їх до групи високофункціональних бетонів (High Performance Concretes) і розглядати як інноваційний матеріал в сучасному будівництві. В Японії близько 50% нових залізобетонних конструкцій виготовляється з СУБ, в Європі на їх частку припадає 7...10% обсягу виробленого бетону. У значно меншій мірі набули поширення ці бетони в країнах СНД, хоча і тут є приклади успішної їх реалізації, зокрема в Росії побудовані такі унікальні споруди як: монолітний ростверк пілона М-7 Російського моста у Владивостоці; фундамент під висотний Багатофункціональний комплекс «Лахта-центр»; дослідні блоки Саяно-Шушенської та Бурейської ГЕС; будівля реактора ЛАЕС-2; кільцеві коридори реактора НВАЕС та ін. [101].

В Україні також є певний досвід застосування самоущільнюваних бетонів. Так зокрема, проведена реконструкція п'ятиповерхового Будинку побуту в Харкові (укріплення колон та підлог будівлі) [11].

Відзначено позитивний досвід застосування самоущільнюваних бетонів в дорожньому будівництві, які забезпечують — поліпшення якості дорожнього полотна, підвищення швидкості будівництва, зниження енергоспоживання і трудомісткості процесу [26].

У той же час, залишаються не в повному обсязі вирішеними проблеми, пов'язані з деформаційними характеристиками самоущільнюваних бетонів - підвищеною усадкою і повзучістю, зниженим модулем пружності. Значний вплив на властивості сумішей і бетонів може створювати проблема сумісності застосовуваних в складі СУБ модифікаторів між собою і з портландцементом. Крім того, вартість основних добавок-суперпластифікаторів на основі полікарбоксилатних ефірів, а також мікрокремнезему, залишається досить високою. Це обумовлює необхідність пошуку рішень по розробці складів поліфункціональних модифікаторів, основу яких складають різні відходи промисловості, що забезпечують отримання бетонних сумішей і бетонів з нормованими показниками якості.



1.2. Особливості використання суперпластифікаторів для отримання самоущільнюваних бетонів

Однією з головних умов отримання самоущільнюваних бетонів є застосування суперпластифікаторів при відносно високому вмісту дисперсних матеріалів у вигляді портландцементу, мінеральних добавок, мелених наповнювачів і (або) дуже дрібного піску [12]. Суперпластифікатори являють собою поліелектроліти про органічного походження (поверхнево-активні речовини – ПАР), які функціонують, як дисперсне хімічне середовище в гетерогенних системах [20; 41]. При цьому їх ефективність проявляється в здатності зберігати технологічні властивості бетонних сумішей протягом не менше 30 хвилин – часу, необхідного для формування виробів [1].

ПАР найчастіше застосовуються не як індивідуальні продукти, а в композиціях. Пояснюється це рядом причин як економічного, так і фізико-хімічного характеру. Наприклад, суміш високо- і низькомолекулярних ПАР. Виськомолекулярні ПАР зумовлюють високу стійкість дисперсних систем завдяки створенню на поверхні міцного драглистоподібного структурованого адсорбційного шару завтовшки в десятки і сотні нанометрів. Низькомолекулярні ПАР забезпечують високий диспергуючий ефект і сильно знижують поверхневий натяг на межі поділу фаз.

Як відомо [18; 45; 47; 68], суперпластифікатори поділяють на чотири основні види: продукти конденсації сульфованого нафталіну з формальдегідом (СНФ), меламінсульфоокислоти з формальдегідом (СМФ), модифіковані лігносульфонати технічні (МЛСТ) і полімери (П), що включають поліакрилати, полістирольні сульфонати та полікарбоксилатні ефіри. Механізм їх дії на дисперсні системи, зокрема цементні пасти, тісно пов'язаний з адсорбцією на продуктах гідратації клінкерних мінералів. Адсорбція в цементних системах має свої особливості – принципове значення можуть мати хімічна (просторова) будова молекул добавок або будова адсорбційного шару.

Основним фактором, що визначає адсорбцію полярних сполук в водних розчинах, є здатність молекул води утворювати



водневі зв'язки як з самими молекулами, так і з поверхнею адсорбенту [126]. В свою чергу, адсорбційний механізм пластифікуючої дії ПАР передбачає дисоціацію іоногенних груп і адсорбцію їх на активних центрах поверхні твердої фази та її гідрофолізацію [135].

За А.М. Когановським [58] на гідрофільних поверхнях оксидів, гідроксидів або алюмосилікатів адсорбція полярних молекул можлива тільки внаслідок специфічної (хімічної або кулонівської) взаємодії, тому що витіснення води (декількох молекул) вимагає значних витрат енергії. У зв'язку з цим більшість молекул суперпластифікаторів, що представляють собою аніонні поліелектроліти, адсорбуються на позитивно заряджених мінералах портландцементного клінкеру C_3A і C_4AF , а також продуктах їх гідратації в результаті електростатичної взаємодії [21]. При цьому, в механізмі дії суперпластифікаторів типів СНФ, СМФ, МЛСТ переважає ефект електростатичного відштовхування частинок цементу і стабілізації, викликаний тим, що адсорбційні шари з молекул добавки збільшують величину ζ – потенціалу на поверхні цементних часток до величини $-23...-28$ мВ [3; 12; 89; 97]. Навпаки, диспергація і стабілізація цементних паст при використанні просторових полімерних молекул модифікованих поліакрилатів та полікарбоксилатів забезпечується в основному за рахунок сильного стеричного ефекту відштовхування цементних частинок [29]. За рахунок бічних гідрофобних поліефірних ланцюгів молекул полікарбоксилатів тривалість їх пластифікуючої дії в 3-4 рази більша порівняно з сульфомеламіновими, сульфонафталіновими формальдегідами або лігносульфонатами [7; 12]. Зазначена здатність дозволяє не тільки підвищити рухомість розчину в ранні строки, але і, як правило, зберігати її протягом більшого періоду часу, що позитивно позначається на термінах транспортування бетонних сумішей до будівельних майданчиків.

Водоредукуючий ефект сучасних суперпластифікаторів на основі модифікованих полікарбоксилатних ефірів становить від 30 до 40% і більше, в той час як для модифікованих лігносульфонатів його значення, як правило, не перевищує 15%,



а) для сульфонованих меламін(нафталін)формальдегідних конденсатів – 25% [14, 20, 68]. При цьому, як відомо, якщо суперпластифікатори першого-другого покоління ефективні в рухливих бетонних сумішах і дають слабкий пластифікуючий ефект при низькому вмісті води замішування, то полікарбоксілатні суперпластифікатори забезпечують високий пластифікуючий ефект навіть в бетонних сумішах з водоцементним відношенням менше 0,2, що характерно для складів високоміцних бетонів. Для досягнення подібного ефекту в таких сумішах дозування СМФ (СНФ) суперпластифікаторів повинна бути в три рази більше [7].

Однак і добавки на основі полікарбоксілатних ефірів не позбавлені певних недоліків [101]:

- проблема сумісності з цементами різного хіміко-мінералогічного складу;
- висока чутливість до низьких температур [120];
- підвищене повітровтягування, що може знижувати міцність бетону (1% втягнутого повітря знижує межу міцності приблизно на 4-5%) - при надмірному повітровтягуванні в бетонну суміш доцільно вводити добавки, що пригнічують цей процес [124];
- особливі умови зберігання – не можна допускати високу вологість і температуру навколишнього середовища;
- висока вартість – за даними [29], якщо вартість суперпластифікаторів типу «П» (полікарбоксілатні, поліакрилатні полімери) в перерахунку на суху речовину прийняти за 100%, то вартість СП на основі СМФ-конденсатів складе 80%, СНФ – 40%, МЛСТ – 20%.

Згідно [5; 17; 18; 154; 159] сумісність в системі «портландцемент – суперпластифікатор» включає такі параметри, що пов'язані з цементом: хімічний і мінералогічний склад, зокрема вміст C_3A , вміст лугів і вільного вапна, склад і тип сульфату кальцію (дигідрат, ангідрид), розмір частинок цементу. Беручи до уваги властивості суперпластифікатора, такі фактори мають значення: хімічна природа і середня молекулярна маса, ступінь полімеризації, кількість добавки і спосіб введення в бетонну суміш.

Стосовно до бетону сумісність добавок з цементами



можна розглядати як здатність добавок забезпечувати необхідні технологічні ефекти і підтримувати їх на заданому рівні певний час з урахуванням дії різних факторів [91]. Втрата рухливості бетонної суміші на будівельному майданчику - одна з головних причин, що призводить до неоднорідності міцності і зниження довговічності бетону в конструкціях. Деякі поєднання «портландцемент – суперпластифікатор» забезпечують рівень необхідної рухливості бетонної суміші протягом години, інші – після 10-15 хвилин виявляють схильність до різкого її зниження [5; 41; 45]. Згідно [125] для оцінки реологічної активності СП в поєднанні з конкретним цементом можна використовувати величину граничної напруги зсуву суспензії цементного тіста.

Несумісність в системі «портландцемент – суперпластифікатор» зростає із збільшенням вмісту в клінкері портландцементу трьохкальцієвого алюмінату C_3A [16]. В бетонних сумішах з добавкою нафта(меламін)формальдегідних конденсатів зі збільшенням адсорбції суперпластифікатора на мінералах цементу і продуктах гідратації початкова рухомість підвищується. Однак з плином часу рухливість сумішей падає, що пов'язано з нестачею «вільного» суперпластифікатора в об'ємі порової рідини, необхідної для електростатичної стабілізації дисперсної системи [53]. Така ж картина спостерігається і в разі застосування полікарбоксилатних полімерів – чим вищий вміст C_3A , тим більша критична доза добавки для досягнення необхідного пластифікуючого ефекту [11].

Проте, до коливань хіміко-мінералогічного складу цементу, і особливо вмісту лугів, в меншій мірі схильні розріджувачі на основі сульфованих нафталінформальдегідних конденсатів. При цьому, існує зворотна залежність між кількістю адсорбованого поліметиленафталінсульфонату і областю значень рухливості цементних паст, яка з підвищенням адсорбованого суперпластифікатора знижується, а втрати рухливості підвищуються [3; 53]. За даними досліджень S. Jiang, C. Jolicoeur, B. Kim, T. Nawa та ін. [34; 53] добавка сульфату натрію сприяє підвищенню рухливості цементної пасту в результаті зниження величини адсорбції суперпластифікатора. У



присутності лужного сульфату адсорбція на C_3A і C_4AF інгібується і збільшується на C_3S і $\beta-C_2S$, а загальна кількість адсорбованого пластифікатора зменшується, підвищується його концентрація в рідкій фазі бетонної суміші, що викликає диспергування частинок і зниження в'язкості цементної пасти [91].

Цей факт свідчить про те, що за певних умов суперпластифікатори на основі поліметиленафталінсульфонатів можуть успішно застосовуватися в складах самоущільнюваних бетонних сумішей, незважаючи на те, що в [120] вказується, що для цих цілей можуть бути використані виключно РСЕ-суперпластифікатори.

Слід також зазначити, що СНФ-суперпластифікатори в значно меншій мірі впливають на повітровтягування в бетонну суміш. Так, за даними [67] незалежно від виду застосовуваної повітровтягувальної поверхнево-активної добавки СНФ-суперпластифікатор знижує водовідділення і не здійснює повітровтягувальної дії. Однак, з іншого боку, показано [118], що застосування СНФ-суперпластифікаторів спільно з ефірами целюлози призводить до утворення водневих зв'язків між добавками і зниження водоредукуючого ефекту пластифікуючої добавки. Крім того, підвищення дозування стабілізуючої добавки при незмінній кількості пластифікатора і нормальній стійкості до розшарування самоущільнюваної бетонної суміші призводить до незначного зменшення міцності бетону [121].

Отже, самоущільнювані бетонні суміші з поліметиленафталінсульфонатами необхідно проводити по першому типу – порошковому, із застосуванням великої кількості тонкодисперсних мінеральних матеріалів. Ю.М. Баженов [63] та П.Г. Комохов [103] відзначають, що ефективність добавки суперпластифікатора багато в чому залежить від способу її введення в бетон. Найкращі результати досягаються, наприклад, коли мінеральна добавка - мікрокремнезем або суміш мікрокремнезема з золю-виносом, змішується з суперпластифікатором заздалегідь. Такий підхід став основою для створення комплексних модифікаторів на



органомінеральній основі з використанням суперпластифікаторів нового покоління, активних і малоактивних мінеральних добавок [68].

Alonso M.M. та ін. [6] в своїх дослідженнях відзначили, що полікарбоксилат добре адсорбується не тільки зернами цементу, а й мінеральними наповнювачами. При цьому, кількість добавки, адсорбованої на поверхні золи-виносу та доменного гранульованого шлаку, є дещо меншою, ніж на поверхні вапняку. Зважаючи на наявність негативно заряджених функціональних сульфогруп молекули поліметиленафталінсульфонатів також здатні адсорбуватися на активних центрах поверхні мінеральних добавок. З ростом поверхневого заряду адсорбція добавок збільшується [90].

Адсорбційну активність мінеральних добавок (наповнювачів) також пов'язують з їх гідравлічної активністю. Згідно [93] наявність в бетоні мінеральних добавок низької гідравлічної активності підвищує пластифікуючий ефект суперпластифікатора С-3, і для отримання литих бетонних сумішей потрібна менша кількість добавки. На противагу, пластифікуючий ефект С-3 в бетонних сумішах з високоактивними мінеральними добавками є нижчим, а ефективне дозування С-3 різко зростає. Так, бетонні суміші, що містять в якості добавки мікрокремнезем, навіть при дозуванні до 10% потребують підвищеної витрати суперпластифікаторів [35].

Різними авторами відзначено, що введення мінеральних добавок - термоактивованого каоліну [118], мікрокремнезему [168] або меленого вапняку [55] спільно з суперпластифікатором забезпечує менші втрати рухомості бетонної суміші протягом перших двох годин після приготування, ніж без мінеральної добавки.

Модифікування мінеральних добавок дозволяє, змінюючи природу їх поверхні (гідрофільність, електричний заряд, будова подвійного електричного шару, концентрацію поверхневих активних центрів), в широких межах активувати процес структуроутворення цементних дисперсій і формування мікроструктури каменю в'язучого [31; 106].



1.3. Мінеральні добавки і наповнювачі в складах самоущільнюваних бетонів

Як зазначено вище, для забезпечення стійкості до розшарування самоущільнюваних бетонних сумішей до їх складу вводять або добавки-стабілізатори – модифікатори в'язкості, або тонкодисперсні мінеральні добавки (наповнювачі) у великій кількості. Модифікатори в'язкості – це, як правило, полісахариди, які включають похідні целюлози (метилцелюлоза) та акрилові полімери. Механізм їх дії в кожному випадку різний. Деякі добавки адсорбуються на частинках цементу і підвищують в'язкість за рахунок підсилення міжчастинкового притягання. Бетонна суміш, яка містить модифікатор в'язкості, проявляє ефект розрідження, в результаті чого удавана в'язкість суміші зменшується зі збільшенням швидкості зсуву [22]. При цьому модифікуюча дія органічних стабілізуючих добавок вичерпується на стадії бетонних сумішей.

Тонкодисперсні мінеральні добавки в цьому сенсі мають переваги перед органічними добавками-загущувачами, так як поряд з покращенням реологічних властивостей бетонних сумішей забезпечують підвищення фізико-механічних і експлуатаційних характеристик бетону. Поєднання мінеральних добавок із суперпластифікаторами при оптимізації гранулометричного складу заповнювачів дозволяє отримати високоміцні бетони (міцність при стиску не менше 70 МПа) із самоущільнюваних сумішей [41; 71; 132; 158].

Залежно від дисперсності мінеральні добавки поділяють на добавки-розбавлювачі цементу, близькі за своїм гранулометричним складом до цементу – зола-виносу ТЕС, мелений доменний гранульований шлак тощо, та на добавки-ущільнювачі, наприклад, мікрокремнезем, метакаолін, які мають розмір частинок приблизно в 100 разів менше зерен цементу і питому поверхню 20-30 м²/г [63]. Введення мінеральних добавок може створювати сприятливий вплив на різні властивості бетону, що пов'язано або з фізичним ефектом, який проявляється в тому, що дрібні частинки зазвичай мають більш тонкий гранулометричний склад, ніж портландцемент, або з



реакціями активних гідравлічних складових. Мінеральні добавки можуть впливати на реологічні властивості бетонної суміші, ступінь гідrataції портландцементу, міцність і проникність затверділого бетону, опір тріщиноутворенню при тепловій обробці, зменшення впливу різних лугів на кремнезем, а також опір при впливі сульфатного агресивного середовища [59; 157]. Серед активних мінеральних добавок з відходів промисловості – зола-виносу ТЕС завдяки особливостям сфероїдальних частинок застосовується в складах СУБ для зниження водопотреби і підвищення текучості бетонних сумішей [30; 149], в той час як серед наповнювачів для підвищення в'язкості розчинної складової самоущільнюваних бетонів найбільшого поширення, зокрема в Європі, отримав мелений вапняк [42].

Неоднозначний вплив на реологічні властивості цементних систем можуть чинити ультрадисперсні мінеральні матеріали, наприклад мікрокремнезем. Його частинки, розподіляючись в загальному об'ємі цементної дисперсії, утворюють в сукупності з більш крупними частинками просторовий тривимірний каркас, що складається з ланцюжків і агрегатів з численними коагуляційними контактами. В результаті істотно змінюються реологічні властивості: підвищуються структурна і пластична в'язкість, когезія і тиксотропні властивості сумішей, як наслідок посилення міжчасткових взаємодій [8]. У той же час, при певних умовах і оптимальному дозуванні мікрокремнезем може зменшувати водопотребу бетонних сумішей або підвищувати їх рухомість. Згідно [8] цей ефект можна пояснити тим, що сферичні частки добавки виконують функцію «підшипників кочення», знижуючи тертя між частинками («ball bearing effect»).

Даний ефект може трактуватися і з інших позицій. Так, в роботі [105] поліпшення реологічних характеристик бетонних сумішей при введенні ультрадисперсних мікронаповнювачів на шлаковій основі до складу цементу автори пов'язують із заміщенням вільної води в міжзерновому просторі цементної пасти і, відповідно, зниженням водопотреби.

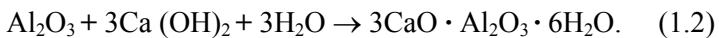
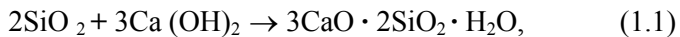
Поєднання мікрокремнезему (10%) і нанокремнезему



($d=15$ нм, 2%) забезпечує поліпшення консистенції бетонної суміші: знижується водовідділення і розшарування. З підвищенням витрати цементу від 400 до 500 кг/м³ спостерігається підвищення міцності бетону, поліпшення реологічних властивостей сумішей [28].

На думку Ю.М. Баженова [110] основна структурна роль мікронаповнювача якраз і полягає в ущільненні системи твердіючого цементу. На структурному рівні цементуючих речовин ультрадисперсні мінеральні добавки (частинки, розмір яких на один-два порядки менше, ніж цемент), наприклад мікрокремнезем, крім цієї прямої функції виконують також фізико-хімічну структуроутворюючу функцію [65]. Встановлено [110], що мікронаповнювач з відходів габро, діабазу та вапняку сприяє самоущільненню і формуванню більш міцного каркасу багатокомпонентних бетонів на основі литої суміші.

При виробництві високоякісних бетонів найбільш перспективним є використання мінеральних добавок, що володіють пуцоланічними властивостями. Згідно [89] відповідно до ASTM C 618 до пуцоланових відносяться «кремнеземисті або кремнеземисті та глиноземисті матеріали, які самі по собі мають невеликі або взагалі не мають в'язучих властивостей, але в сильно подрібненому вигляді і при наявності вологи вступають в хімічну реакцію з гідроксидом кальцію при нормальній температурі з утворенням сполук, що володіють в'язучими властивостями»:



Природні або техногенні пуцоланові добавки зазвичай містять поверхневі силанольні або алюмінільні групи, які є донорами протонів. В цьому випадку акцептори протонів здатні міцно зв'язуватися з поверхневими центрами силікатних мінеральних добавок [122]. В роботі С.В. Мінакова [119] на основі методу квазіізометричної диференціальної калориметрії показано, що вже в перші хвилини взаємодії з водою негативно



заряджені (електронодонорні) активні центри мінеральних добавок служать підкладкою, на якій осідають електрооакцепторні зародки частинок гідроалюмінатних фаз і портландиту, що затримує їх ріст і знижує тепловиділення в індукційному періоді, відсуваючи його на період тужавлення. Це узгоджується з думкою А.Г. Ольгинського [128], що структуроутворююча роль мінеральних добавок полягає в скороченні індукційного періоду формування структури в результаті адсорбції продуктів гідролізу і збільшення часу досягнення пересичення рідкої фази. Таким чином, мінеральна добавка активізує процеси гідратації в'язучого, сприяє збільшенню обсягу та ступеня кристалічності утворюваних гідратів, серед яких зростає частка більш міцних і стійких низькоосновних гідросилікатів кальцію типу CSH (I) з співвідношенням C/S < 1,0 замість первинних кристалогідратів типу портландиту і високоосновних гідросилікатів кальцію, що сприяє ущільненню структури на контакті з добавкою зі значним підвищенням мікротвердості гідратних зростків [98].

Таким чином, мінеральні добавки є невід'ємним компонентом сучасних бетонів. Їх застосування дозволяє знизити вміст клінкерного цементу, модифікувати склад новоутворень каменю в'язучого, підвищити щільність структури, і, як наслідок, міцність, довговічність та стійкість бетону в агресивних умовах експлуатації. Наприклад, за даними Та Ван Фан [153] введення до складу бетону мікронаповнювачів у вигляді метакаоліну і золи від спалювання рисового лушпиння в поєднанні з ефективним для даного цементу гіперпластифікатором забезпечує підвищення межі міцності бетону при стиску до 70%, модуля пружності бетону до 15%, зниження контракційної усадки до 30%.

При використанні мікрокремнезему в якості наповнювача необхідно обов'язково враховувати його вплив на підвищення границі міцності бетону [125]. Виконання досить жорстких вимог щодо зниження деформацій усадки і повзучості бетону вдалося досягти шляхом введення мінеральних наповнювачів – золи-виносу та мікрокремнезема. З підвищенням їх вмісту в складі бетону деформації повзучості і усадки істотно



знижуються [67].

При формуванні мікро- і наноструктури модифікованого бетону слід виділити особливу роль добавки ультрадисперсного мікремнезему [104], що представляє собою побічний продукт при виплавці феросиліцію і його сплавів у вигляді кулястих частинок з високим вмістом аморфного кремнезему, який утворюється в результаті відновлення вуглецем кварцу високої чистоти в електропечах і вловлюється рукавними фільтрами при очищенні відхідних газів [89]. Його гідралічна активність за показником пуцоланізації в структурі цементної матриці більш ніж в 1,5 рази перевищує активність мінеральної добавки трепелу і залежить від хімічного складу і природи домішок, що визначається видом сплаву, що виробляється в печі [104; 154]. В середньому при виплавці тони феросиліцію утворюється від 50 до 250 кг мікркремнезему. Середній розмір частинок мікркремнезему становить 68 нм, при цьому вміст частинок з розміром до 200 нм становить 50%, до 500 нм – 96%. Унікальною властивістю мікркремнезему є висока величина повної вільної поверхневої енергії, що обумовлює його хімічну активність [114].

У той же час, широкому застосуванню мікркремнезема в складах бетонів перешкоджають обмежена технологічність добавки в зв'язку з її низькою насипною густиною, а також висока вартість. Якщо раніше кремнеземистий пил розглядали як неминучі і непотрібні відходи, то сьогодні його вартість, як правило, перевищує вартість цементу: у Швеції – в 1,5-2 рази, в Великобританії – в 2-3 рази, в США – в 5 раз [133]. У зв'язку з цим йде постійний пошук найбільш ефективних композицій мінеральних добавок, в яких частина мікркремнезему замінюється іншими, більш доступними матеріалами. При цьому такі композиції часто здійснюють більший комплексний вплив на властивості бетонних сумішей та бетонів, ніж однокомпонентні добавки.

Турецькими вченими зазначено, що комплекс з двох або трьох добавок з портландцементом: доменний гранульований шлак, зола-виносу, мікркремнезем – має високу ефективність для покращення властивостей СУБ [30]. З точки зору



забезпечення водоутримуючої здатності самоущільнюваних сумішей і високої міцності бетону встановлено найбільш ефективні композиції: мікрокремнезем і зола-виносу в співвідношенні 50:50; комплекс з мікрокремнезему із золю-виносу і розширювальна добавка у співвідношенні 50: 50 [71].

У роботі [160] показана ефективність комбінування в складах високоміцного бетону комплексу мінеральних добавок, що включає золу-виносу, мікрокремнезем, шамотно-каоліновий пил, а також мелений доменний граншлак, шлак ТЕС, вапняк. Визначено оптимальні співвідношення між мінеральними добавками, на основі яких розроблені склади багатокомпонентних композиційних цементів. Розроблені склади композиційних цементів за показниками якості відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010.

Серед перерахованих мінеральних добавок найбільшу величину відносної густини має доменний гранульований шлак – 2,9. На думку [49] ця добавка повинна обов'язково бути присутньою в складах самоущільнюваних бетонів, виконуючи функцію модифікатора густини (density modifier) для забезпечення седиментаційної стійкості крупного заповнювача в цементно-піщаній матриці. У той же час, бетони з високим вмістом доменного граншлаку замість частини портландцементу, як правило, характеризуються подовженими термінами тужавлення і низькими темпами наростання міцності в ранньому віці твердіння [57]. Даний факт вимагає розробки заходів щодо усунення цього ефекту, наприклад, застосуванням комплексу добавок, що включає суперпластифікатор, прискорювач твердіння тощо.

Особливий інтерес представляє вивчення впливу спільного введення суперпластифікатора і мінеральної добавки, оскільки при цьому може змінюватися не тільки пористість цементного каменю, а й співвідношення між продуктами гідратації, модуль пружності яких різний. За даними Г.В. Несветаєва [124] суперпластифікатор на основі ефіру полікарбоксілатів змінює відносну величину модуля пружності цементного каменю від 0,895 до 1,067, тобто в межах 10%, в той час як при спільному застосуванні з мінеральною добавкою



досягається більш істотне підвищення величини відносного модуля пружності від 0,67 до 1,46, тобто в межах 20%. При цьому, як зазначено вище дуже важливе значення має порядок введення добавок в бетонну суміш як з точки зору ефекту, що досягається, так і технологічних аспектів. На думку В.Г. Батракова [68] найбільш перспективним є створення комплексних модифікаторів на органомінеральній основі з використанням суперпластифікаторів нового покоління, активних і малоактивних мінеральних добавок.

1.4. Актуальність, мета та задачі досліджень

Технологія самоущільнюваних бетонів в Україні не так сильно поширена як в Японії і в Європі. Як і раніше, масове будівництво орієнтоване на виробництво і використання бетонів невисоких марок з міцністю 20-50 МПа з підвищеними витратами цементу. На даний момент в Україні не існує нормативної бази, що стосується самоущільнюваних бетонів а також сфери їх застосування. Тому, на даний момент необхідно використовувати європейські нормативні документи.

Аналіз наведених вище результатів досліджень дозволяє констатувати, що, незважаючи на певні успіхи, досягнуті в розвитку технології самоущільнюваних бетонів, повністю вирішеною цю проблему вважати не можна, а експериментальний досвід в цій області бетонознавства залишає не розкритим цілий ряд питань.

У зв'язку з цим, розвиток науково обґрунтованих принципів виготовлення та випробування самоущільнюваних бетонів, вивчення їх рецептур і властивостей, виявлення чинників, що впливають на ці властивості в процесі експлуатації є актуальною проблемою.

1. Можливість застосування золи-виносу ТЕС в технології бетону і, зокрема, самоущільнюваного бетону відома давно. Але вплив комплексу технологічних факторів, що обумовлюють ефективність використання золи в СУБ досліджено недостатньо.
2. Зола-винос зазвичай характеризується порівняно невисокою ефективністю, тому викликає інтерес використання



золи в комплексі із ефективним мінеральним наповнювачем.

3. Широко відомий мінеральний наповнювач в самоущільнюваних бетонах – мікрокремнезем, є достатньо дорогим компонентом, тому пошук більш дешевих альтернатив залишається важливим питанням в технології СУБ.
4. Переважна більшість досліджень по самоущільнюваним бетонам виконано на матеріалах, які відсутні в Україні, або є дорогими (важкодоступними). Внаслідок цього, важливого значення набуває дослідження можливості використання місцевих сировинних матеріалів, як компонентів СУБ.
5. На сьогодні не існує чітких методик проектування складу СУБ із заданими властивостями.

У відповідності до вищесказаного метою досліджень, результати яких наведено далі, є розробка ефективної технології СУБ, виготовленого на місцевих матеріалах з покращеними експлуатаційними характеристиками. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Дослідити властивості цементно-зольного тіста і самоущільнюваних бетонних сумішей з використанням золи-виносу.
2. Дослідити вплив комплексу технологічних факторів, що впливають на міцнісні властивості самоущільнюваних бетонів а також властивості, що характеризують їх довговічність.
3. Встановити можливість виготовлення СУБ з використанням композиційного золо-метакаолінового наповнювача. Вивчити вплив основних факторів на властивості бетонних сумішей та бетонів.
4. Дослідити властивості модифікованих самоущільнюваних бетони з добавками полімерів. Визначити оптимальний склад поліфункціонального модифікатора.
5. Розробити ефективну методику проектування складу самоущільнюваного бетону із заданими властивостями.



РОЗДІЛ II САМОУЩІЛЬНЮВАНІ ЗОЛОВОМІСНІ БЕТОНИ

Як зазначено вище, застосування самоущільнюваних бетонів стримується низкою факторів: такі бетони вимагають підвищеної витрати цементу (в порівнянні з середньо-пластичними), схильні до водовідділення і розшарування. Для усунення цих негативних особливостей ефективно використання тонкодисперсних мінеральних добавок. Однією з найбільш перспективних добавок для застосування в литих та самоущільнюваних бетонах є зола-виносу теплових електростанцій. На відміну від інших мінеральних добавок зола-виносу зменшує водопотребу бетонних сумішей або залишає її без зміни. Однак введення золи поряд зі скороченням витрат цементу може призводити при певних умовах до погіршення ряду технологічних і будівельно-технічних властивостей бетону [74; 129].

Метою досліджень наведених, в цьому розділі, є обґрунтування оптимальних технологічних параметрів використання золи-виносу різної дисперсності при виготовленні бетонів з покращеними будівельно-технічними властивостями із самоущільнюваних бетонних сумішей.

У досліджах застосовували портландцемент Здолбунівського «ВАТ Волинь-цемент» ПЦ 500 I, золу-виносу Ладиженської ТЕС, кварцовий пісок (0,16...2 мм) і гранітний щебінь крупністю 2-5 мм. У цементно-зольне тісто і бетонні суміші вводили добавку суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f.

2.1. Властивості цементно-зольного тіста та бетонних сумішей

Реологічні властивості цементно-зольного тіста. Наявні дані не дозволяють вважати вирішеним питання про спільний вплив вмісту золи і її дисперсності, що змінюється при помелі, на реологічні властивості цементно-зольного тіста, особливо що містить добавку полікарбоксилатного суперпластифікатора. Для



виявлення особливостей впливу золи на властивості цементного тіста були вивчені його рухомість по розпливу конуса на приладі Сутгарда і ефективна в'язкість, виміряна ротаційним віскозиметром РВ-8М.

Дослідження виконані із застосуванням математичного планування експерименту [83]. Умови планування експерименту наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Умови планування експерименту

Фактор, вид		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	-1	0	+1	
Відношення $V/(Ц+З)$	X_1	0,24	0,28	0,32	0,04
Частка золи D_3 за масою в суміші цементу і золи, %	X_2	20	40	60	20
Вміст суперпластифікатора Melflux 2651f	X_3	0,6	0,8	1,0	0,2
Питома поверхня золи, S_3 , $см^2/г$	X_4	2900	3900	4900	1000

Примітки: 1. Дослідження виконані на золі-виносу Ладиженської ТЕС з питомою поверхнею (S_3) 2900 $см^2/г$. Домел золи до необхідних значень S_3 здійснювали в лабораторному кульовому млині. 2. В, Ц, З – витрати відповідно води цементу золи в $кг/м^3$.

В результаті обробки експериментальних даних отриманих при реалізації дослідів відповідно до трьохфакторного плану B_4 отримані експериментально-статистичні (математичні) моделі діаметра розпливу конуса (Y_1) та ефективної в'язкості бетонної суміші (Y_2):



$$Y_1 = 27,04 + 2,86X_1 - 1,02X_4 - 2,29X_1^2 + 0,93X_1X_4 + 0,45X_2^2 - 1,25X_3X_4 + 0,2X_3^2 + 0,7X_4^2; \quad (2.1)$$

$$Y_2 = 3,24 - 1,03X_2 + 0,53X_4 + 0,48X_1^2 - 0,18X_1X_4 - 0,05X_2^2 - 0,19X_2X_4 - 0,16X_3^2 + 0,3X_4^2. \quad (2.2)$$

Аналіз математичних моделей (2.1) і (2.2) показав, що пластифікуючий ефект золи і її вплив на діаметр розпливу конуса D_p (Y_1) і величину ефективної в'язкості $\ln \eta$ (Y_2) не можуть бути однозначно обумовлені введенням кількістю золи в цементне тісто з добавкою суперпластифікатора Melflux, а в значній мірі залежать від дисперсності золи (рис. 2.1). Так, зміна вмісту золи від 20 до 60% при її питомій поверхні $S_3 = 2900$ $\text{см}^2/\text{г}$ призводить до збільшення рухливості на 2 см (величина D_p збільшилася від 28 до 30 см) і зменшення величини ефективної в'язкості (величина $\ln \eta$ зменшилася від 2,6 до 2,3); при $S_3 = 3900$ $\text{см}^2/\text{г}$ збільшення процентного вмісту золи в досліджуваному інтервалі не призводить до зміни рухомості ($D_p = 27$ см) і ефективної в'язкості ($\ln \eta = 3,2$); а при $S_3 = 4900$ $\text{см}^2/\text{г}$ спостерігається падіння рухомості (величина D_p зменшується від 28 до 26 см) і збільшення величини ефективної в'язкості (величина $\ln \eta$ змінюється від 3,2 до 3,5). У той же час вплив дисперсності на досліджувані характеристики буде позначатися в більшій мірі при збільшенні процентного вмісту золи (в досліджуваних інтервалах) в цементному тісті. Так, наприклад, при вмісті золи в кількості 20% зміна її дисперсності від 2900 до 4900 $\text{см}^2/\text{г}$ призводить до збільшення ефективної в'язкості – величина $\ln \eta$ збільшується від 2,6 до 3,2, рухливість тіста практично не змінюється ($D_p = 28$ см), а при 60% – збільшення ефективної в'язкості проявляється ще більшою мірою (величина $\ln \eta$ збільшується від 2,3 до 3,5) рухливість ж падає від 30 до 26 см.

Залежність рухливості і ефективної в'язкості цементно-зольного тіста від кількісного вмісту золи і її дисперсності обумовлена зміною водопотреби золи при збільшенні її питомої поверхні шляхом домелу. Проведені визначення водопотреби



золи дозволили отримати такі результати: при $S_3 = 2900 \text{ см}^2/\text{Г НГ}$ золи = 16,75%; при $S_3 = 3900 \text{ см}^2/\text{Г НГ}$ = 25,25%; при $S_3 = 4900 \text{ см}^2/\text{Г НГ}$ = 28,25%.

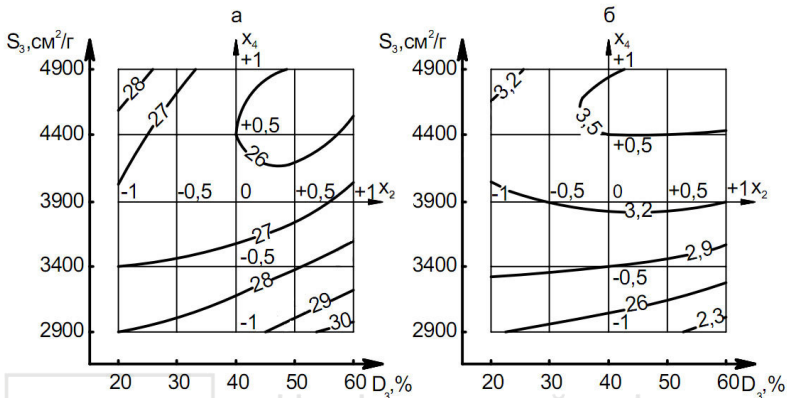


Рис. 2.1. Вплив витрати і дисперсності золи на діаметр розпику і логарифм величини ефективної в'язкості цементного тіста (при $V/(Ц + 3) = 0,28$ і витраті Melflux 2651f 0,8%): а – ізолінії D_p , см; б – ізолінії $\ln \eta$, (Па·с)

На збільшення рухливості цементно-зольного тіста і зниження величини його ефективної в'язкості впливають і добавки ПАР. Згідно [61] пластифікуючі добавки руйнують зольні і цементні флокули і надають стабілізуючу дію, що перешкоджає розшаруванню зола-цементних композицій в результаті седиментаційних явищ, тобто знижують водопотребу і в'язкість зола-цементного тіста. Разом з тим, є дані [61] про те, що суперпластифікатори практично не змінюють текучості зольного тіста, тому що не забезпечують диспергування крупних конгломератів золи. Підвищення дозування СП понад певного оптимального значення не призводить до зниження початкової в'язкості тіста.

Результати проведених експериментів дозволяють зробити висновок, що збільшення дозування СП Melflux 2651f в досліджуваних інтервалах призвело до практично невідчутної зміни рухливості і величини ефективної в'язкості, що



підтверджує можливість вибору оптимальної кількості добавки для цементно-зольного тіста, обумовленої "кінцевим" ефектом її впливу.

Вирішальний вплив на зміну рухливості і ефективної в'язкості цементно-зольного тіста чинить водотверде відношення $V/(Ц+З)$, з ростом якого відбувається збільшення рухливості і зниження величини ефективної в'язкості, причому слід зауважити, що більш інтенсивна зміна досліджуваних характеристик спостерігається при низьких значеннях водотвердого відношення. Наприклад, при зміні $V/(Ц+З)$ від 0,24 до 0,26 при $S_3 = 4900 \text{ см}^2/\text{г}$ рухливість збільшилася від 20,5 до 24 см, а ефективна в'язкість зменшилася від 172 до 67 Па·с, при зміні $V/(Ц+З)$ від 0,28 до 0,30 рухливість збільшилася від 27 до 28 см, а ефективна в'язкість зменшилася від 32 до 20 Па·с.

Як випливає з аналізу моделі (2.1), збільшення рухливості з ростом водотвердого відношення позначається до його певного значення. При більш високих значеннях $V/(Ц+З)$ може відбуватися падіння рухливості, обумовлене обмеженою водоутримуючою здатністю цементно-зольного тіста.

Зі збільшенням питомої поверхні золи зростає водопотреба цементно-зольного тіста, завдяки чому є можливість підвищити зв'язність і седиментаційну стійкість цементно-зольного тіста. Тому ефективним методом підвищення рухливості при високих значеннях $V/(Ц+З)$ є попереднє домелювання золи. Так, при збільшенні $V/(Ц+З)$ від 0,30 до 0,32 рухливість цементно-зольного тіста при $S_3 = 2900 \text{ см}^2/\text{г}$ падає від 29 до 28 см. А при $S_3 = 4900 \text{ см}^2/\text{г}$ падіння практично відсутнє ($D_p = 28 \text{ см}$).

Властивості самоущільнюваних бетонних сумішей

Умови планування експериментів при моделюванні властивостей самоущільнюваних цементно-зольних бетонних сумішей наведені в табл. 2.2. Використовувався план типу N_{a5} [83].

В якості заповнювача використовували фракційну суміш – 0,16...2 мм (кварцовий пісок) та 2...5 мм (гранітний щебінь).



Таблиця 2.2

Умови планування експериментів

Фактор, вид		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	-1	0	+1	
Водоцементне відношення, В/Ц	X ₁	0,3	0,4	0,5	0,05
Витрата води, кг/м ³	X ₂	170	180	190	10
Частка піску в об'ємі піску та щебеню, r _n	X ₃	0,34	0,41	0,48	0,07
Витрата золи D ₃ , кг/м ³	X ₄	50	150	250	100
Питома поверхня золи S ₃ , кг/м ³	X ₅	2900	3900	4900	1000

В результаті експериментально-статистичної обробки отримано комплекс наведених нижче поліноміальних моделей, що характеризують діаметр розпливу стандартного конуса, см (Y₃), витрата добавки суперпластифікатора Melflux 2651f (СП), кг/м³ (Y₄) необхідної для отримання високорухомої самоущільнюваної суміші класів SF1 та SF2, а також параметрів, що визначають однорідність і стійкість бетонних сумішей до розшарування: водовідділення, г/л (Y₅), розчинівідділення, % (Y₆) і tg η (Y₇). Крім цього отримана поліноміальна модель об'єму залученого повітря, % (Y₈).

$$Y_3 = 56,05 + 3,39X_1 + 1,39X_2 - 2,84X_3 - 0,5X_4 + 2,78X_5 - 3,07X_1^2 - 3,08X_2^2 + 1,9X_3^2 - 1,07X_4^2 + 0,43X_5^2 + 2,25X_1X_4 + 1,13X_2X_5 + 1,12X_3X_4 - 2,25X_3X_5; \quad (2.3)$$

$$Y_4 = 3,28 - 0,07X_1 - 0,94X_2 - 1,06X_3 + 0,37X_4 + 0,7X_5^2 + 0,25X_3^2 + 0,14X_4^2 - 0,23X_5^2 - 0,24X_1X_2 - 0,25X_1X_4 - 0,32X_1X_5 - 0,17X_3X_5; \quad (2.4)$$



$$Y_5 = 0,37 - 0,35X_1 + 0,51X_2 + 0,75X_3 - 0,56X_4 - 0,45X_5 - 0,15X_1^2 + 0,57X_3^2 - 0,15X_4^2 + 0,23X_5^2 - 0,09X_1X_2 - 0,09X_1X_3 - 0,22X_1X_5 + 0,41X_2X_3 - 0,33X_2X_4 - 0,28X_2X_5 - 0,32X_3X_4 - 0,32X_3X_5 + 0,2X_4X_5; \quad (2.5)$$

$$Y_6 = 5,65 + 0,94X_1 - 2,48X_3 - 0,63X_4 + 1,28X_5 - 0,43X_1^2 - 0,43X_2^2 + 1,37X_3^2 - 1,23X_4^2 - 1,56X_5^2 - 0,48X_1X_2 + 0,46X_1X_4 + 0,7X_1X_5 + 0,56X_2X_3 - 0,56X_2X_4 + 0,81X_3X_5 - 0,53X_3X_5; \quad (2.6)$$

$$Y_7 = 0,23 - 0,08X_1 - 0,04X_2 + 0,06X_3 - 0,07X_5 + 0,12X_1^2 + 0,05X_2^2 - 0,05X_3^2 + 0,02X_4^2 + 0,01X_5^2 - 0,07X_1X_4 - 0,02X_3X_4; \quad (2.7)$$

$$Y_8 = 0,86 - 0,24X_1 - X_2 + 1,03X_3 - 0,6X_4 + 1,4X_5 - 0,2X_1^2 + 0,91X_2^2 + 0,79X_4^2 + 0,05X_5^2 + 0,53X_1X_3 - 0,54X_1X_5 - 0,65X_2X_5 - 0,34X_3X_4 + 0,41X_3X_5 - 0,59X_4X_5. \quad (2.8)$$

Для порівняльної оцінки впливу технологічних факторів на легкоукладальність самоущільнюваних сумішей, що мають практично однакову осадку конуса, може служити модель діаметра розпливу конуса (Y_3). Вплив основних технологічних факторів на легкоукладальність можна простежити і з аналізу моделі необхідної витрати добавки суперпластифікатора (Y_4). Відомо, що гранулометричний склад золи-виносу, що дозволяє заповнити в бетонних сумішах нестачу зерен, що мають проміжну крупність між цементом і піском, а також гладка куляста поверхня частинок золи, зумовлюють підвищення легкоукладальності жорстких і пластичних бетонних сумішей [27; 33; 87; 112; 113].

Отримані результати дозволили підтвердити це положення і для самоущільнюваних золівмісних бетонних сумішей. Причому, збільшення водовмісту при незмінних інших факторах призводить до підвищення оптимальної витрати золи.

Поряд з тим, як впливає з аналізу моделей (рис. 2.2), вплив витрати золи на легкоукладальність не може розглядатися без урахування її дисперсності. Аналіз моделей (2.3 і 2.4) показує, що вплив дисперсності золи на легкоукладальність



самоущільнюваної суміші не може бути оцінений однозначно. Крім D_3 на вплив питомої поверхні золи позначається В/Ц і частка піску в об'ємі піску та щебеню бетонних сумішей.

Аналіз математичних моделей (2.3) і (2.4) дозволяє зробити висновок, що збільшення питомої поверхні золи-винесу при її оптимальних витратах і високих значеннях В/Ц сприяє підвищенню легкоукладальності самоущільнюваної бетонної суміші. Зі зменшенням В/Ц позитивний ефект подрібнення золи згасає.

Збільшення дисперсності золи, введеної в оптимальних кількостях при максимальній частці піску (в досліджуваних інтервалах), сприяє підвищенню легкоукладальності самоущільнюваної суміші, при мінімальній частці піску – легкоукладальність погіршується (рис. 2.2, б).

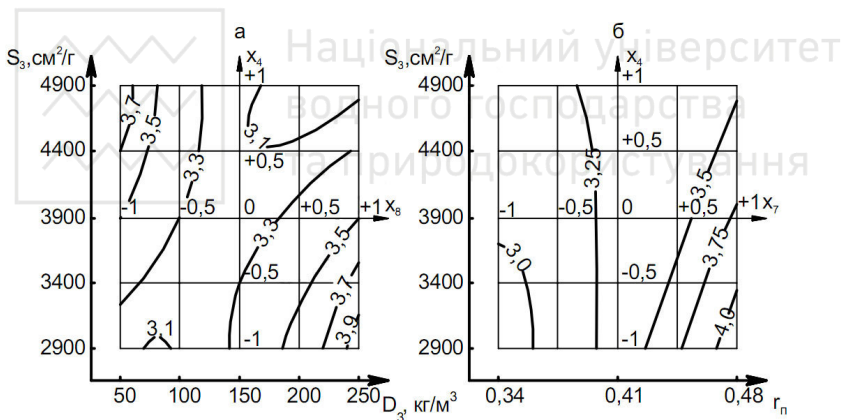


Рис. 2.2. Зміна витрати СП «Melflux 2651f» ($\text{кг}/\text{м}^3$) в самоущільнюваних золовмісних бетонних сумішах:
а – від S_3 і D_3 при В/Ц = 0,6; $V = 190 \text{ кг}/\text{м}^3$; $r_{II} = 0,41$;
б – від S_3 і r_{II} при В/Ц = 0,6; $V = 190 \text{ кг}/\text{м}^3$; $D_3 = 150 \text{ кг}/\text{м}^3$

Цей факт обумовлений зміною гранулометричного складу золи при її помелі. При помелі золи в першу чергу різко скорочується вміст крупних частинок, що при зниженій частці піску в суміші заповнювачів несприятливо позначається на



загальній гранулометрії заповнювачів суміші [27; 43], при підвищеній же частці піску, навпаки, сприяє створенню найбільш сприятливої для досягнення максимальної легкоукладальності безперервної гранулометрії. Для самоущільнюваних бетонних сумішей одними з найважливіших властивостей, що характеризують їх якість, є водовідділення і розшаровуваність.

Аналіз математичної моделі (2.5) показує, що ефективність добавки золи-виносу зростає зі збільшенням її кількості і зі зменшенням В/Ц. При цьому останнє є головним фактором, що визначає водовідділення. Так, при витраті золи 90 кг і В/Ц = 0,3 величина водовідділення становить 0,25 г/л, а зі збільшенням В/Ц до 0,5 водовідділення зростає до 1,45 г/л (рис. 2.3).

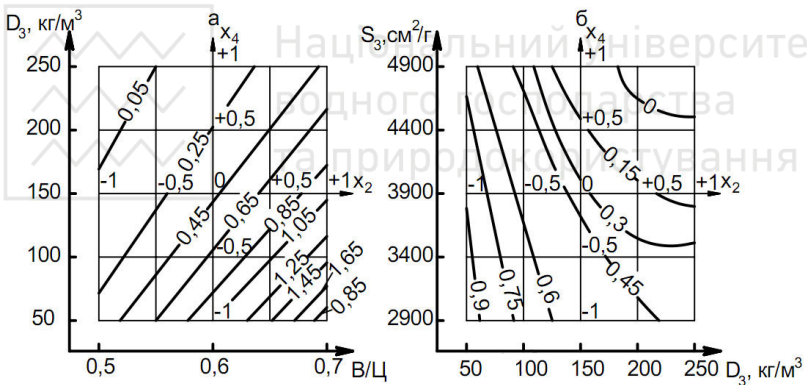


Рис. 2.3. Ізолнії водовідділення (г/л) самоущільнюваних золовмісних сумішей:

$$а - B = 180 \text{ кг/м}^3; r_{II} = 0,41; S_3 = 4900 \text{ см}^2/\text{г};$$

$$б - B/C = 0,4; B = 180 \text{ кг/м}^3; r_{II} = 0,41$$

При В/Ц = 0,5 збільшення D₃ від 50 до 150 кг/м³ призводить до зменшення водовідділення від 1,85 г/л до 1,05 г/л. Подальше збільшення D₃ до 250 кг/м³ дозволяє зменшити величину водовідділення до 0,45 г/л.

Позитивний вплив на величину водовідділення



самоущільнюваних золовмісних бетонів має, поряд зі збільшенням витрати золи, і підвищення її дисперсності (рис. 2.3). Наприклад, при витраті золи 250 кг з питомою поверхнею 2900 см²/г величина водовідділення становить 0,45 г/л, а при збільшенні питомої поверхні до 3900 см²/г величина водовідділення знижується до 0,15 г/л.

Таким чином, чутливість водовідділення до витрати золи суттєво зростає в міру збільшення її питомої поверхні, що обумовлює можливість при підвищеному В/Ц використовувати золу при раціональному дозуванні 150...200 кг/м³ в якості водоутримуючої добавки в самоущільнюваних бетонних сумішах після її додаткового подрібнення.

З аналізу моделі (1.5) можна також зробити висновок, що на величину водовідділення позитивний вплив від збільшення витрати золи позначається більшою мірою при одночасному збільшенні частки піску в суміші заповнювачів.

Особливістю самоущільнюваних сумішей є можливість внутрішнього і зовнішнього розшарування. Перше обумовлено дією сили тяжіння і зменшується в міру збільшення в'язкості розчинної частини і зменшення крупності зерен заповнювача [15; 46]. Друге виникає в результаті недостатнього зчеплення щебеню і розчинної складової, що може бути обумовлено надмірно високою в'язкістю останньої або підвищеним вмістом щебеню [80].

На підставі аналізу математичних моделей (2.6) і (2.7) можна зробити висновок, що добавка золи-виносу робить позитивний вплив на зниження величини розшарованості самоущільнюваної золовмісної бетонної суміші. При цьому слід зазначити екстремальний характер цього впливу (рис. 1.4), який можна пояснити тим, що оптимальній витраті золи відповідає деяка найкраща гранулометрія суміші [46].

Оптимальне значення витрати золи для забезпечення мінімального розчинивідділення перевищує аналогічну величину для досягнення максимального значення $\operatorname{tg} \varphi$ (рис. 2.4, а) – параметра, що характеризує стійкість суміші до розшарування (10): $\operatorname{tg} \varphi = (30 - \text{OK})/0,5 D_p$, де ОК – осадка конуса; D_p – діаметр розпливу конуса.



Якщо самоущільнювана суміш при ущільненні піддається короточасній вібрації, то для забезпечення нерозшаровуваності витрата золи повинен бути збільшена на 20...30 кг/м³. При скороченні витрати золи нерозшаровувані бетонні суміші можна отримати шляхом збільшення частки піску (рис. 2.4).

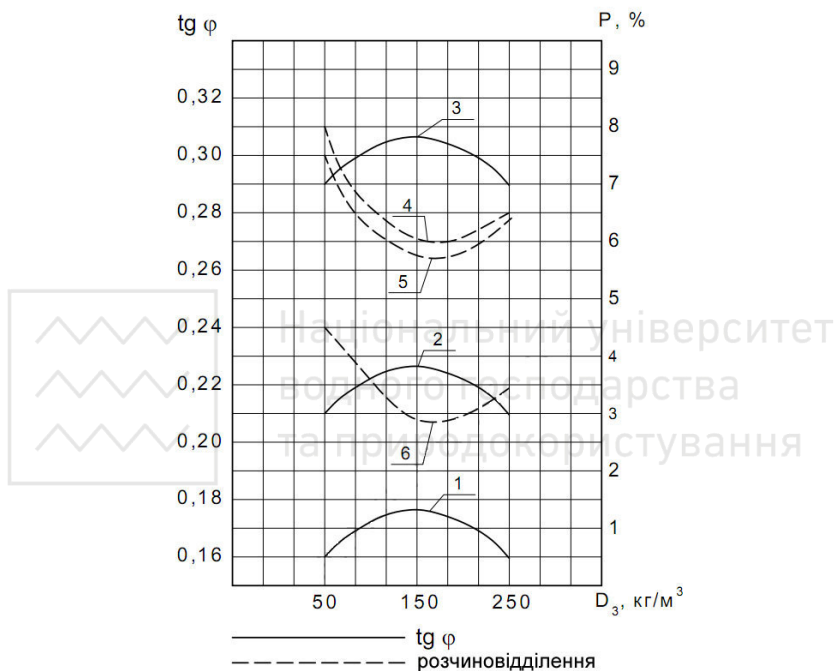


Рис. 2.4. Вплив витрати і дисперсності золи на розчиновідділення (P) самоущільнюваних золомісних бетонних сумішей:
(В/Ц = 0,4; В = 180 кг/м³; $r_{II} = 0,41$ і S_3 : 1, 4 – 4900; 2, 5 – 3900;
3, 6 – 2900 см²/г)

В [75] показано, що збільшення дисперсності золи (шляхом її домолу) призводить до значного підвищення в'язкості цементно-зольного тіста з добавкою СП, що зумовлює зростання в'язкості розчинової складової бетону.



Надмірно високою в'язкістю розчинової складової обумовлене підвищення розшаровуваності самоущільнюваного золівмісного бетону при збільшенні дисперсності золи. Однак, слід зауважити, що при підборі оптимальних складів такого бетону величина розшаровуваності не виходить за межі допустимої ($\text{tg } \varphi \geq 0,2$ і розчиновідділення 5%).

Як видно з аналізу математичних моделей (2.5), (2.6) і (2.7) оптимальні значення витрати золи і її дисперсності різні для параметрів водовідділення і розшарування самоущільнюваного золівмісного бетону. Так, наприклад, підвищення вмісту золи в бетонній суміші від 150 до 250 кг/м^3 при $\text{В/Ц} = 0,4$ зменшує величину $\text{tg } \varphi$ (рис. 2.4), в той же час роблячи позитивний вплив на величину водовідділення (рис. 2.3). Тому вибір оптимальних витрат золи і її дисперсності необхідно виконувати в деякій компромісній зоні таким чином, щоб він дозволяв отримувати бетонні суміші, що задовольняють всім заданим вимогам.

Повітровтягування в самоущільнюваних бетонних сумішах є одним з основних факторів, що визначають міцність, однорідність і довговічність бетону. Відомо, що кожен відсоток залученого повітря обумовлює зниження міцності бетону на 5...10%.

Залучення повітря відбувається в процесі перемішування, вивантаження і укладання бетонної суміші і залежить від складу бетонної суміші, характеристик матеріалів для її приготування, дозування добавки пластифікатора.

Введення до складу самоущільнюваних бетонних сумішей добавок суперпластифікаторів дозволяє збільшити повітровтягування до 3% [154]. Однак, такі суміші збіднені повітрям внаслідок його швидкої втрати, зумовленої низькою в'язкістю сумішей.

Використання золи-виносу, що піддається додатковому помелу, підвищує в'язкість цементних систем [85], що в свою чергу має сприяти утримуванию в самоущільнюваних сумішах з СП залученого повітря. У той же час зола-виносу в бетоні виконує функцію наповнювача, що зумовлює зменшенню його пористості і утворенню більш щільної структури бетону.



Проведений аналіз математичної моделі (2.8) дозволяє підтвердити теоретичні передумови.

Збільшення витрати золи в досліджуваних інтервалах призводить до зменшення величини повітровтягування в самоущільнюваних бетонних сумішах. Збільшення дисперсності золи, навпаки, сприяє збільшенню кількості залученого повітря. Наприклад, при $V/C = 0,3$; $V = 170 \text{ кг/м}^3$; $r_n = 0,41$; $S_3 = 3900 \text{ см}^2/\text{г}$ і витраті золи 50 кг/м^3 об'єм залученого повітря становить 3,8%, при витраті золи 150 кг – 2,6%, а при витраті золи 250 кг – 2,15%, при тих же значеннях V/C і V , $r_n = 0,48$ і $D_3 = 250 \text{ кг/м}^3$ підвищення S_3 з 2900 до $4900 \text{ см}^2/\text{г}$ призводить до збільшення об'єму залученого повітря від 0,9% до 5,6%, тобто до такого об'єму, який повинен забезпечувати досить високу морозостійкість бетону.

Отже, для досягнення певного повітровтягування зі збільшенням витрати золи її дисперсність повинна бути відповідно підвищена. Наприклад, при $D_3 = 50 \text{ кг/м}^3$ для забезпечення повітровтягування 1,05% мінімальна дисперсність золи повинна скласти $S_3 = 3500 \text{ см}^2/\text{г}$, при $D_3 = 150 \text{ кг/м}^3$ – $S_3 = 4050 \text{ см}^2/\text{г}$, а при $D_3 = 250 \text{ кг/м}^3$ мінімальна дисперсність золи повинна перевищувати $4400 \text{ см}^2/\text{г}$.

Вибір витрати золи для забезпечення необхідного повітровтягування слід здійснювати з урахуванням не тільки S_3 , але і r_n . У той же час вибір S_3 залежить від взаємодії з усіма досліджуваними факторами.

Позитивний вплив на повітровтягування від підвищення S_3 позначається в більшій мірі зі збільшенням r_n . Так, підвищення S_3 з 2900 до $4900 \text{ см}^2/\text{г}$ при $r_n = 0,34$ дозволяє досягти повітровтягування 1,77% в бетонній суміші, що практично не містить повітря, а при $r_n = 0,48$ повітровтягування зростає від 0,71 до 4,42%.

Таким чином, забезпечення необхідного повітровтягування як і інших властивостей самоущільнюваних бетонних сумішей з добавкою суперпластифікатора при введенні золи-виносу може бути досягнуто шляхом регулювання витрати і дисперсності золи.



2.2. Міцнісні властивості золовмісних СУБ

Для вивчення залежностей, що визначають міцнісні властивості самоущільнюваних цементно-зольних бетонів, проведена серія експериментів – у відповідності з умовами планування табл. 2.3. В результаті реалізації дослідів, виконаних у відповідності з планом B_4 , отримані експериментально-статистичні моделі міцності бетону (Y_9), коефіцієнтів ефективності використання цементу (Y_{10}) і варіації міцності бетону (Y_{11}) (табл. 2.4).

Таблиця 2.3

Умови планування експериментів

Фактор, вид		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодовий	-1	0	+1	
Водоцементне відношення, В/Ц	X_1	0,3	0,4	0,5	0,05
Витрата води, В	X_2	170	180	190	10
Частка щебеню в сумарному об'ємі щебеню, піску та золи, r_1	X_6	0,45	0,53	0,61	0,08
Частка золи в сумарному об'ємі золи та піску, r_2	X_7	0,1	0,2	0,3	0,1
Модуль крупності піску, M_k	X_8	1,4	2,4	3,4	1



Таблиця 2.4

Експериментально-статистичні моделі міцності бетону, K_e та V_n

Показник	Модель
Міцність при стиску в 28 діб нормального твердіння ($R_{ст}$), МПа	$y_9 = 46,8 - 8,23X_1 - 1,17X_3 + 4,53X_4 - 3,91X_5 + 3,20X_1^2 + 6,62X_2^2 + 4,37X_3^3 - 11,12X_4^2 - 8,48X_5^2 - 3,13X_1X_3 + 2,30X_2X_5 - 1,13X_3X_5 \quad (2.9)$
Коефіцієнт ефективності використання цементу $K_e = R_{ст}/D$	$y_{10} = 0,82 - 0,003X_2 + 0,008X_4 - 0,007X_5 + 0,012X_2^2 + 0,007X_3^2 - 0,019X_4^2 - 0,015X_5^2 - 0,002X_1^2 - 0,005X_1X_2 - 0,0027X_1X_5 + 0,0046X_2X_5 - 0,002X_3X_5 \quad (2.10)$
Коефіцієнт варіації міцності бетону, (V_n), %	$y_{11} = 4,33 + 1,63X_1 - 2,3X_2 + 0,08X_3 + 1,13X_4 - 0,6X_5 - 1,07X_1^2 + 2,03X_2^2 + 7,34X_3^2 + 0,48X_4^2 - 2,97X_5^2 - 2,03X_1X_2 + 0,64X_1X_3 + 0,84X_1X_4 + 0,21X_1X_5 + 2,49X_2X_3 + 1,13X_3X_4 - 1,18X_3X_5 + 0,85X_4X_5 \quad (2.11)$

Таблиця 2.5

Ізорівні міцності бетону

Номер ізорівня	Міцність бетону, МПа при $S_{пит}$, см ² /г		
	2900	3900	4900
1	23,0	27,7	15,3
2	26,5	31,0	18,5
3	29,7	34,2	21,8
4	32,9	37,4	25,0
5	36,2	40,7	28,3
6	39,4	44,1	31,7
7	42,7	47,3	34,9
8	46,1	50,6	38,2
9	48,4	53,8	41,4
10	52,6	57,1	44,6

Примітка. Наведено середні значення міцності бетону при відхиленнях в межах ізорівней до 1,6 МПа.



Для аналізу моделей міцності були побудовані діаграми ізорівнів (рис. 2.5). Значення ізорівнів міцності бетону наведені в табл. 2.5. Відповідно до цих діаграм інтервал можливих значень витрати золи при збільшенні як міцності бетону, так і водоцементного відношення при незмінній міцності звужується. Так, для отримання золівмісного самоущільнюваного бетону з міцністю в 28-добовому віці 46,1 МПа при В/Ц = 0,35 кількість золи може коливатися від 78 до 250 кг, а для бетону з міцністю 52,6 МПа, при тому ж водоцементному відношенні, можливі значення витрати золи знаходяться в інтервалі 118...222 кг. Для досягнення однакової рухомості бетонної суміші при зміні витрати золи потрібно коригувати витрату суперпластифікатора.

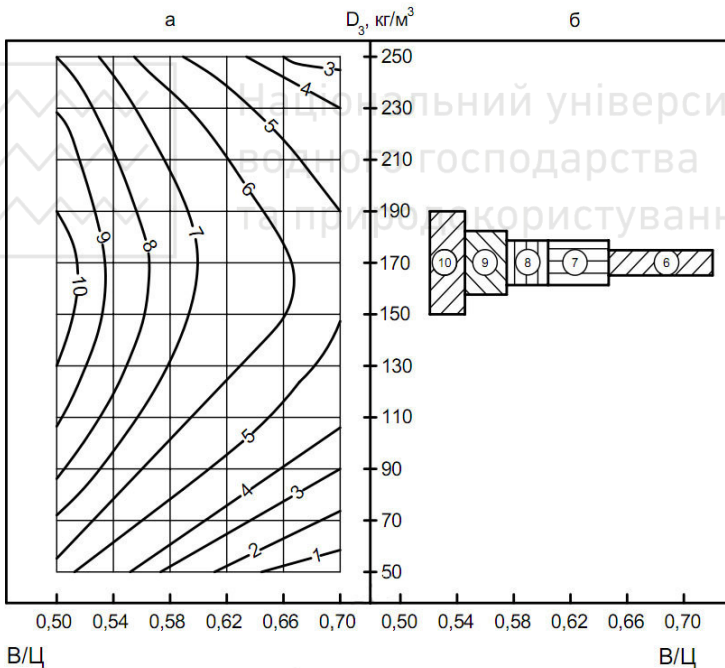


Рис. 2.5. Діаграма міцності самоущільнюваних золівмісних бетонів:

а – об'єднана діаграма міцності при $V = 180 \text{ kg/m}^3$, $r_{II} = 0,41$;

б – об'єднана діаграма оптимальних значень витрати золи



Аналіз діаграм (рис. 2.5) дозволяє стверджувати про можливість вибору оптимальних значень витрати золи та її дисперсності. Якщо за оптимальну приймати мінімально можливу витрату золи, то зі збільшенням В/Ц вона зростає, що відповідає даним [92] для малорухомих золівмісних бетонів. Для практичних цілей, проте, оптимальну витрату золи можна призначати однаковою у всьому діапазоні міцності бетону. Цю витрату можна знайти аналітично з моделі (1.5), визначивши часткову похідну по X_4 : $dy_9 / dx_4 = 2,52 - 12,4X_4$. Для прийнятих умов $X_{4\text{опт.}} = 0,2$, тобто $D_{3\text{ опт.}} = 170 \text{ кг/м}^3$.

У ряді робіт відзначається неухильне підвищення міцності бетону з підвищенням дисперсності золи [100; 152]. Поряд з тим, в деяких дослідженнях [127] при постійному водоцементному відношенні підвищення дисперсності золи не привело до збільшення міцності. Очевидно, що характер впливу дисперсності золи на міцність бетонів та розчинів залежить від сукупності факторів: вихідної рухомості, водов'язучого відношення, пустотності заповнювачів, виду застосовуваної золи, умов твердіння бетону та ін.

З одного боку, збільшення дисперсності золи (шляхом її помелу) повинно приводити до збільшення її хімічної активності, що чинить позитивний вплив на зростання міцності бетону. З іншого боку, збільшення дисперсності золи викликає збільшення вмісту повітря в бетонній суміші і в'язкості розчинової складової [85]. Остання при досягненні значень вище допустимих призводить до зовнішнього розшарування [80]. Слід врахувати, що на міцність бетону впливає гранулометричний склад вихідних компонентів. Надмірне збільшення вмісту дрібних фракцій золи може привести до розшарування самоущільнюваного бетону [80].

Аналіз моделі міцності (2.10) показує, що при постійному В/Ц і витраті золи вплив її дисперсності на міцність самоущільнюваного бетону носить екстремальний характер (рис. 2.6). На відміну від оптимального значення витрати золи її оптимальна дисперсність залежить від витрати води і частки піску в суміші заповнювачів.

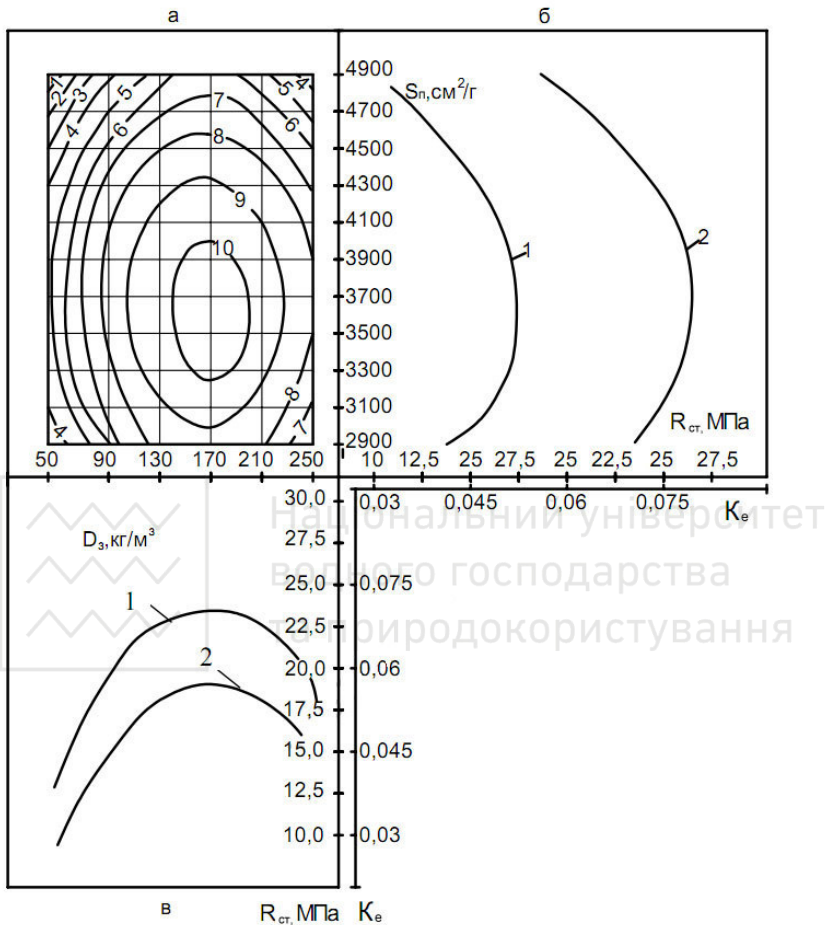


Рис. 2.6. Об'єднана діаграма міцності і коефіцієнта ефективності використання цементу самоущільнюваних золівмісних бетонів:
а – ізолінії міцності і коефіцієнта ефективності використання цементу при $B/\Pi = 0,35$; $B = 180 \text{ кг} / \text{м}^3$, $r_{\Pi} = 0,41$;
б – графіки розподілу міцності і коефіцієнта ефективності використання цементу при: 1 – $D_3 = 50 \text{ кг}/\text{м}^3$; 2 – $D_3 = 150 \text{ кг}/\text{м}^3$;
в – графік розподілу міцності і коефіцієнта ефективності використання цементу при: 1 – $S_3 = 290 \text{ м}^2/\text{кг}$; 2 – $S_3 = 490 \text{ м}^2/\text{кг}$



Аналітичний вираз для оптимальної питомої поверхні при прийнятих умовах моделювання виявився рівним:

$$X_{5_{\text{опт}}} = (1,28X_2 - 0,63X_3 - 2,17)/9,42. \quad (2.12)$$

Однак, зміна r_n і водовмісту не чинить істотного впливу на $S_{3_{\text{опт}}}$. Наприклад, при $X_2 = 0$ ($B = 180 \text{ кг/м}^3$); $X_3 = 0$ ($r_n = 0,41$); $X_5 = -0,23$ ($S_{3_{\text{опт}}} = 3670 \text{ см}^2/\text{г}$) при $X_2 = 1$ ($B = 190 \text{ кг/м}^3$); $X_3 = -1$ ($r_n = 0,34$); $X_5 = 0$ ($S_{3_{\text{опт}}} = 3870 \text{ см}^2/\text{г}$) а при $X_2 = -1$ ($B = 1780 \text{ кг/м}^3$); $X_3 = +1$ ($r_n = 0,48$); $X_5 = -0,43$ ($S_{3_{\text{опт}}} = 3470 \text{ см}^2/\text{г}$).

Отже, оптимальну дисперсність золи, аналогічно оптимальній витраті золи, можна призначити постійною для широкого діапазону міцності самоущільнюваного бетону. Інтервал значень $S_{3_{\text{опт}}}$: 3500...4000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Витрата цементу в самоущільнюваних золовмісних бетонах при оптимальних значеннях витрати золи та її дисперсності значно нижча, ніж в звичайних пластифікованих бетонах. Наприклад, для досягнення СУБ з добавкою СП без золи міцності у віці 28 діб $R_{\text{ст}} = 56 \text{ МПа}$ при $B = 170 \text{ кг/м}^3$; $B/\text{Ц} = 0,3$ і $r_n = 0,43$, витрата цементу склала 565 кг. Цю ж міцність самоущільнюваний золовмісний бетон досяг при витраті цементу 430 кг і витраті золи 150 кг/м^3 з питомою поверхнею $2900 \text{ см}^2/\text{г}$. Отже, економія цементу склала 135 кг на 1 м^3 самоущільнюваного бетону.

Отримані експериментальні і розрахункові дані свідчать про можливість за рахунок введення оптимальної кількості золи-виносу в склади самоущільнюваних бетонів скоротити витрату цементу на 20...23% при одночасному забезпеченні заданої міцності. Помел золи до оптимальної питомої поверхні дозволяє досягти додаткової економії цементу в кількості 8...10%.

Для оптимізації складів золовмісних самоущільнюваних бетонів запропонована методика [141], в основу якої покладено критерій ефективності, що характеризується коефіцієнтом ефективності (K_e) використання цементу (питома міцність на



одиночку витрати цементу).

Аналіз математичної моделі (2.11) і побудованої діаграми (рис. 2.6), яка є графічним виразом математичної моделі в залежності від змінних D_3 і S_3 , дозволяє зробити висновок, що вплив як витрати, так і дисперсності золи на цей критерій носить екстремальний характер.

Відомо, що для помірно рухомих бетонних сумішей у віці 28 діб коефіцієнт ефективності K_e складає 0,065...0,085. Введення золи до складу таких бетонів сприяє зростанню K_e до 0,067...0,12. Отримані результати вказують на можливість досягнення для самоущільнюваних золівмісних бетонів з додавкою полікарбоксилатного СП таких же максимальних значень K_e , як і для помірно рухомого золівмісного бетону.

Оцінку однорідності властивостей бетону проводили за результатами випробувань дванадцяти зразків-кубів з довжиною ребра 10 см досліджуваних складів. В якості кількісної характеристики однорідності був прийнятий коефіцієнт варіації міцності бетону V_m (%):

$$V_m = (S_m / R_m) \cdot 100\%, \quad (2.13)$$

де R_m – міцність бетону в серії, МПа;

S_m – середнє квадратичне відхилення міцності бетону в серії, МПа.

Після завершення експериментальної частини робіт було визначено необхідну кількість зразків (n) бетону для отримання достовірних результатів:

$$n = \frac{V_m^2 \cdot t^2}{E^2}, \quad (2.14)$$

де t – критерій Стьюдента, знайдений при відповідній довірчій ймовірності і числі ступенів свободи;

E – показник точності (5%).

Виходячи з фактичного середнього коефіцієнта варіації міцності бетону, підрахованого за (2.13), необхідна кількість зразків складала не менше десяти.

Аналіз моделі коефіцієнта варіації міцності бетону (2.11) дозволяє зробити висновок, що вплив добавки золи на



однорідність міцності самоущільнюваного бетону носить складний характер. Однорідність залежить не тільки від кількісного вмісту золи та її дисперсності, а й від їхньої взаємодії з усіма досліджуваними технологічними факторами.

Введення до складу самоущільнюваного бетону з добавкою полікарбоксилатного СП немеленої золи (рис. 2.7) сприяє підвищенню однорідності властивостей бетону при збільшенні витрати золи. Підвищення ж дисперсності золи до $S_3 = 4000 \text{ см}^2/\text{г}$ призводить до підвищення V_m . Характер впливу на однорідність міцності бетону подальшого збільшення S_3 неоднозначно залежить від D_3 . Наприклад, при мінімальній (в досліджуваному інтервалі) витраті золи ($D_3 = 50 \text{ кг}/\text{м}^3$) зміна питомої поверхні від 4000 до 4900 $\text{см}^2/\text{г}$ призводить до зменшення V_m від 4,92% до 0,78%, при максимальному ($D_3 = 250 \text{ кг}/\text{м}^3$) – зміна S_3 від 4000 до 4500 $\text{см}^2/\text{г}$ не змінює величину коефіцієнта варіації і лише потім спостерігається її зменшення. При $S_3 = 4900 \text{ см}^2/\text{г}$ величина коефіцієнта варіації становить вже 3,54%.

Для досягнення максимально можливої однорідності міцності самоущільнюваного бетону при початковій дисперсності золи ($S_3 = 2900 \text{ см}^2/\text{г}$) її витрата повинна бути максимальною ($D_3 = 250 \text{ кг}/\text{м}^3$), і навпаки, при максимальній питомій поверхні золи ($S_3 = 4900 \text{ см}^2/\text{г}$) її витрата повинна бути мінімальною ($D_3 = 50 \text{ кг}/\text{м}^3$).

Таким чином, оптимальні значення витрати і дисперсності золи з умови забезпечення максимальної однорідності міцності самоущільнюваного бетону відмінні від їх значень з умови максимальної міцності. При підборі складу самоущільнюваного бетону вибір витрати і дисперсності золи доцільно здійснювати в деякій зоні оптимальних значень з урахуванням всіх вимог, що пред'являються до бетонної суміші і бетону.

З аналітичного розрахунку математичних моделей випливає, що із збільшенням В/Ц, необхідна частка золи (r_2) в сумарному об'ємі золи і піску зростає. При цьому приріст міцності незначний (до 1 МПа), що визначає можливість вибору постійної частки золи для бетонів визначеного віку. У свою чергу, витрата золи при постійній її частці з збільшенням В/Ц



практично не змінюється. Для визначення частки золи її можна вважати постійною.

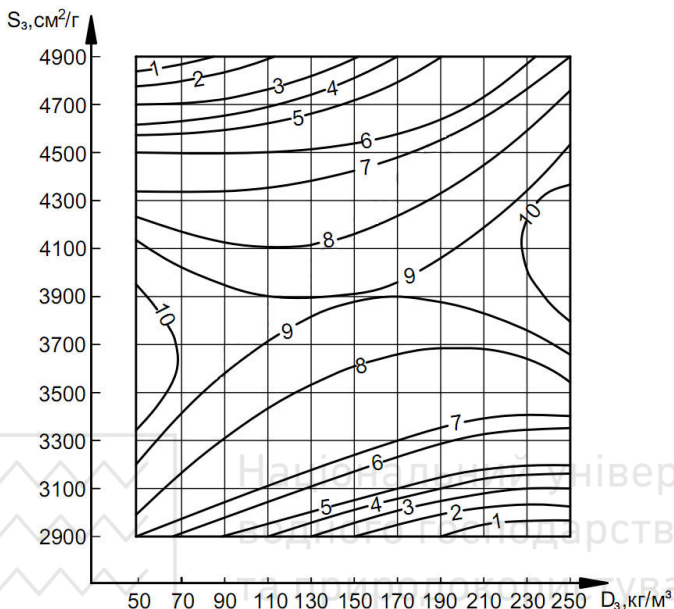


Рис. 2.7. Ізолії коефіцієнта варіації міцності (%) самоущільнюваних золомісних бетонів при $V/Ц = 0,4$; $V = 180 \text{ кг/м}^3$ і $r_n = 0,41$

Для пропарених бетонів у віці 28 діб r_2 вище, ніж для бетонів природного твердіння того ж віку, що є результатом інтенсифікації протікання реакції взаємодії золи з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в умовах тепловологісної обробки.

Оптимальна витрата золи в самоущільнюваних бетонах з віком зменшується (табл. 2.5). У віці 28 діб при підвищеному $V/Ц$ вона може зростати і досягати максимального значення 235 кг/м^3 ($r_2 = 0,276$). У віці 180 діб оптимальна витрата золи знаходиться вже в інтервалі значень $165 \dots 198 \text{ кг/м}^3$ ($r_2 = 0,204 \dots 0,233$). Реакції взаємодії золи з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з віком послаблюються і перекриваються негативним впливом значного розведення в'язучого малоактивним компонентом, що призводить до зниження оптимальної витрати золи.



Таким чином, при підборі складів з умови забезпечення міцності оптимальну витрату золи для самоущільнюваних бетонів нормального твердіння доцільно призначати в інтервалі значень 150...200 кг/м³. Для пропарених бетонів верхня межа інтервалу може бути збільшена до 200...300 кг/м³.

Відомо, що зі збільшенням міцності при стиску збільшується також і міцність на розтяг, але в меншій мірі [84]. Додаток золи-виносу в самоущільнюваних бетонах, сприяючи значному підвищенню міцності при стиску, разом з тим не чинить істотного впливу на міцність на розтяг в усьому досліджуваному часовому інтервалі. Це можна пояснити тим, що введення золи сприяє створенню додаткових центрів кристалізації, які забезпечують підвищення міцності при стиску і більш сприятливих умов для росту кристалів, що в свою чергу сприяє появі значних напружень, що негативно впливають на розтяг.

Міцність бетону значно залежить від модуля крупності M_k піску (рис. 2.8). Наприклад, заміна піску з $M_k = 1,4$ на пісок з $M_k = 2,4$ дозволяє підвищити міцність бетону при стиску на 15...25%. Вплив M_k на міцність залежить від віку самоущільнюваного бетону. Для міцності на розтяг при розколюванні вплив M_k з віком є менш відчутним.

Зростання міцності в часі узгоджується з особливостями структуроутворення самоущільнюваних золовмісних бетонів. Високі значення коефіцієнта зростання міцності при стиску є результатом інтенсифікації процесу структуроутворення. Завдяки здатності золи з часом зв'язувати вільне вапно, що утворюється при твердінні портландцементу і приводить до утворення додаткових центрів кристалізації, спостерігається порівняно інтенсивне зростання міцності самоущільнюваних бетонів.

Отримані результати свідчать про можливість досягнення значень коефіцієнта зростання міцності до 180 діб, що перевищують 1,6...1,7 при $V/C = 0,4$; при $V/C = 0,3$ величина його може опускатися нижче 1,5.

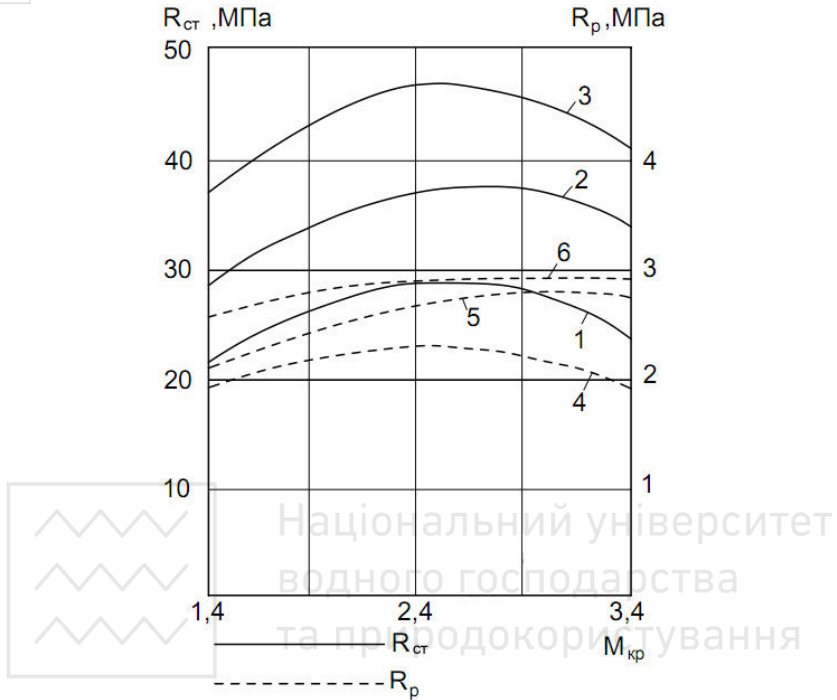


Рис. 2.8. Вплив $M_{кр}$ на характеристики міцності самоущільнюваних золовмісних бетонів при $V/Ц = 0,35$; $V = 180 \text{ кг/м}^3$; $r_1 = 0,53$; $r_2 = 0,2$: 1, 4 – 28 діб; 2, 5 – 90 діб; 3, 6 – 180 діб.

Для звичайних бетонів в залежності від складу цементу після пропарювання вдається досягти 50...80% міцності після 28 діб повітряно-вологісних умов тверднення. Більше значення міцності бетону можна отримати тільки з особливо жорстких сумішей при тривалому періоді пропарювання.

Отримані результати дозволяють вважати, що міцність при стиску самоущільнюваних золовмісних бетонів після пропарювання може досягати понад 90% міцності у віці 28 діб. При цьому на вихід міцності пропарених бетонів позитивно впливає підвищення дисперсності золи.



2.3. Властивості, що характеризують довговічність СУБ

Тріщиностійкість. Тріщиностійкість бетонів залежить від цілого комплексу факторів: теплового розширення, повзучості, зміни пружно-пластичних характеристик бетону зі зміною температури і ряду інших. Тому вибір критерію та оцінка тріщиностійкості бетонів є досить складною задачею.

Зменшення небезпеки утворення тріщин в бетонах при введенні золи пов'язують зі зниженням тепловиділення [150]. Однак, за критерієм термічної тріщиностійкості визначення порівняльної тріщиностійкості ускладнене (особливо через необхідність врахування впливу масштабного фактору при переході від зразка до конструкції). З цією метою найбільш доцільним є використання іншого критерію – відношення міцності на розтяг до міцності при стиску $(R_p/R_{ct}) \cdot 100\%$ [84]. Збільшення цього відношення вважається більш сприятливим з позиції тріщиностійкості і, як було показано в ряді досліджень [92; 100], воно змінюється в часі від 15...18% у віці 3 діб до 6...7% в 180 діб.

Аналіз отриманих експериментальних даних (табл. 2.6) дозволяє вважати, що для самоущільнюваних золівмісних бетонів з добавкою полікарбоксилатного СП, які тверднуть в нормальних умовах, величина відношення R_p/R_{ct} зі збільшенням інтервалу часу зменшується і до 180 діб досягає характерних для більшості бетонів значень 6...7%.

Зменшення відношення R_p/R_{ct} в часі відображає особливості процесів структуроутворення цементного каменю, складу бетону і умов його твердіння [123; 151]. Відомі для звичайних цементних бетонів положення в повній мірі можна віднести і до самоущільнюваних золівмісних бетонів. Наприклад, зміна частки щебеню в об'ємі заповнювача дозволяє стабілізувати відношення R_p/R_{ct} в інтервалі часу 90...180 діб.

Звертає на себе увагу той факт, що зі збільшенням віку самоущільнюваного золівмісного бетону зменшується кількість факторів та їх взаємодій, що впливають на відношення R_p/R_{ct} .



Таблиця 2.6

Експериментально-статистичні моделі міцності СУБ

Показник	Модель
Міцність при стиску бетону нормального твердіння, МПа: 28 діб	$y_{12} = 60,06 - 9,04X_1 + 4,40X_7 + 4,18X_1^2 - 0,85X_2^2 - 4,32X_6^2 - 4,80X_7^2 - 10,40X_8^2 + 3,09X_1X_7 + 1,57X_2X_6 \quad (2.15)$
90 діб	$y_{13} = 74,42 - 10,02X_1 + 5,66X_4 + 4,27X_5 + 10,45X_1^2 - 5,49X_2^2 + 5,28X_3^2 - 4,75X_4^2 - 7,04X_5^2 \quad (2.16)$
180 діб	$y_{14} = 96,39 - 1,12X_1 + 4,08X_2 + 4,426X_4 + 3,71X_5 + 0,35X_1^2 + 2,27X_2^2 + 5,92X_3^2 - 7,34X_4^2 \quad (2.17)$
Міцність при стиску бетону, МПа: після 4 год. пропарювання за режимом (2)+3+6+2 при 80°	$y_{15} = 55,44 - 7,44X_1 + 5,76X_7 + 2,56X_1^2 - 1,58X_2^2 - 0,30X_6^2 - 2,64X_7^2 - 6,08X_8^2 + 2,16X_1X_7 + 1,70X_2X_6 \quad (2.18)$
в 28 діб після пропарювання	$y_{16} = 62,37 - 11,34X_1 + 5,04X_7 + 5,28X_1^2 - 1,74X_2^2 - 0,48X_6^2 - 2,56X_7^2 - 7,20X_8^2 + 2,00X_1X_7 + 1,07X_2X_6 \quad (2.19)$
Міцність на розтяг при розколюванні бетону нормального твердіння, МПа: 28 діб	$y_{17} = 4,70 - 0,45X_1 + 0,43X_4 + 0,24X_1^2 + 0,06X_2^2 + 0,24X_3^2 - 0,42X_4^2 - 0,48X_5^2 - 0,29X_3X_4 \quad (2.20)$
90 діб	$y_{18} = 5,46 - 0,64X_1 + 0,30X_4 + 0,46X_5 + 0,82X_1^2 + 0,11X_2^2 - 0,10X_3^2 - 0,43X_4^2 - 0,37X_5^2 \quad (2.21)$
180 діб	$y_{19} = 6,09 - 0,72X_1 + 0,30X_4 + 0,29X_5 + 0,42X_1^2 + 0,06X_2^2 + 0,83X_3^2 - 0,78X_3^2 - 0,51X_5^2 - 0,43X_1X_2 + 0,30X_1X_3 \quad (2.22)$
Міцність на розтяг при розколюванні бетону, МПа: 4 год. після пропарювання	$y_{20} = 3,65 - 0,37X_1 + 0,53X_4 + 0,18X_1^2 - 0,13X_2^2 - 0,06X_3^2 + 0,24X_4^2 - 0,29X_5^2 - 0,32X_3X_5 \quad (2.23)$
28 діб після пропарювання	$y_{21} = 4,70 - 0,53X_1 + 0,42X_4 + 0,22X_1^2 + 0,32X_2^2 + 0,24X_3^2 - 0,30X_4^2 - 0,74X_5^2 \quad (2.24)$



Регулювання частки золи в об'ємі дрібного заповнювача (в досліджуваному інтервалі) незначно впливає на характер зміни в часі величини $R_p/R_{ст}$, а, отже, і на характер процесу тріщиноутворення. Мінімізація частки золи дозволяє лише в інтервалі 28...90 діб загальмувати процес падіння величини відношення міцних показників.

Відношення $R_p/R_{ст}$ для самоущільнюваних золовмісних пропарених бетонів досліджували також як відразу після пропарювання, так і у віці 28 діб. Величина відношення міцностей в цьому віковому інтервалі, як правило, зростає (рис. 2.9).

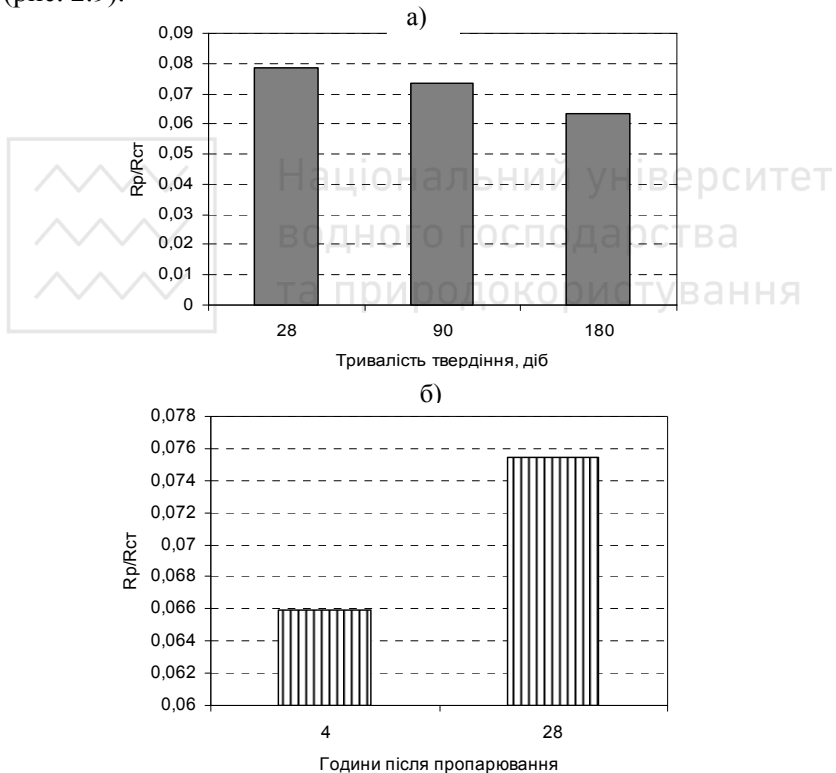


Рис. 2.9. Значення відношення $R_p/R_{ст}$ для СУБ у часі (усі фактори зафіксовані на нульовому рівні):

а) нормального твердіння; б) після пропарювання



Вплив досліджуваних технологічних факторів на $R_p/R_{ст}$ для самоущільнюваних пропарених золівмісних бетонів носить більш складний характер ніж при нормальному твердінні, збільшується кількість чинників і їх взаємодій, що впливають на цей показник.

На відміну від бетонів нормального твердіння для відношення $R_p/R_{ст}$ в самоущільнюваних золівмісних пропарених бетонах є важливим вибір оптимального значення частки золи в об'ємі дрібного заповнювача. Без урахування впливу взаємодії з іншими технологічними факторами досягнення максимального значення частки золи не дозволяє в свою чергу досягти максимального значення $R_p/R_{ст}$ як відразу після пропарювання, так і у 28 віці діб.

Водонепроникність. Водонепроникність бетону у значній мірі залежить від особливостей його пористої структури. Якщо на міцність бетону основний вплив чинить загальна пористість, то водонепроникність є функцією відкритої наскрізної пористості. У ряді досліджень [150; 166] зазначено, що основними шляхами проникнення води в бетон є пори седиментаційного походження, утворення яких є найбільш характерна для литих та самоущільнюваних бетонів [80]. Седиментація залежить головним чином від в'язкості цементного тіста, а основною седиментаційною характеристикою бетонної суміші слугує її водовідділення.

Як було показано раніше, добавка золи-виносу має суттєвий вплив на в'язкість пластифікованого цементного тіста і водовідділення самоущільнюваної бетонної суміші. За рахунок введення золи-виносу в самоущільнювану суміш зменшується кількість мікропор і відбувається кольматація відкритих пор.

Побудована на основі експериментальних даних (умови планування наведені в табл. 2.3) математична модель водонепроникності самоущільнюваного золівмісного бетону (Y_{22} , МПа) підтверджує теоретичні передумови.

$$y_{22} = 0,93 - 0,15X_1 + 0,06X_6 + 0,02X_1^2 - 0,04X_6^2 - 0,08X_7^2 - 0,03X_8^2 - 0,03X_1X_2 - 0,03X_1X_8 - 0,07X_2X_6 + 0,03X_2X_7 + 0,03X_6X_7 + 0,05X_7X_8. \quad (2.25)$$



Основним фактором, що визначає величину водонепроникності самоущільнюваного золовмісного бетону, як і для традиційних бетонів, є водо-цементне відношення. Різке зменшення водонепроникності самоущільнюваного золовмісного бетону при В/Ц менше 0,4...0,5 (рис. 2.10) може бути пояснено зменшенням внутрішнього водовідділення в бетонних сумішах. Підвищення водонепроникності самоущільнюваного бетону пов'язано з вибором оптимальної частки золи (рис. 2.10). Призначення величини r_2 залежить від В, M_k і r_1 . Аналітичний вираз r_2 для водонепроникності має вигляд:

$$X_{7 \text{ опт.}} = (0,03X_2 + 0,03X_6 + 0,05X_8) \cdot 0,16. \quad (2.26)$$

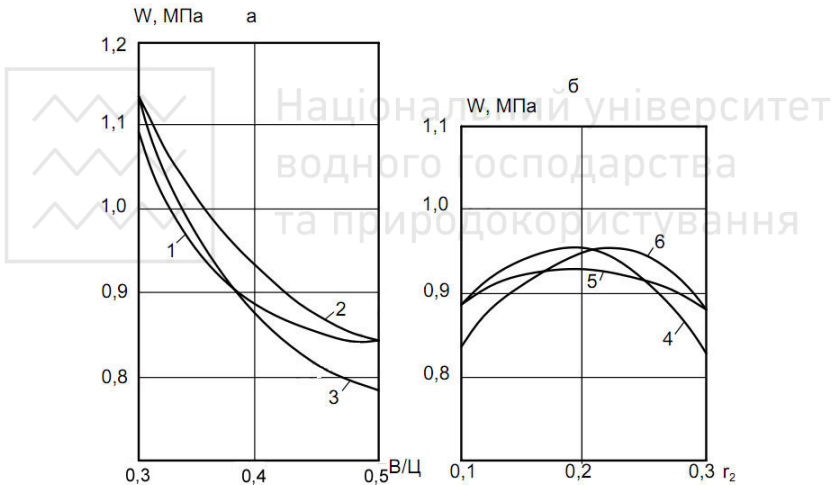


Рис. 2.10. Водонепроникність (W) самоущільнюваних золовмісних бетонів:

- а – В = 170 кг/м³; $r_1 = 0,53$; $r_2 = 0,2$;
- 1 – $M_k = 1,4$; 2 – $M_k = 2,4$; 3 – $M_k = 3,4$;
- б – В/Ц = 0,35; $r_1 = 0,53$; $M_k = 2,4$;
- 4 – В = 170 кг/м³; 5 – В = 190 кг/м³

Водонепроникність самоущільнюваного золовмісного бетону у віці 28 днів за рахунок вибору оптимальних значень факторів і їх поєднань може досягати значення 1,2 МПа.



Зі збільшенням віку бетону водонепроникність неперервно підвищується (рис. 2.11) в результаті незворотної зміни структури порового простору і збільшення об'єму твердої фази в цементному камені.

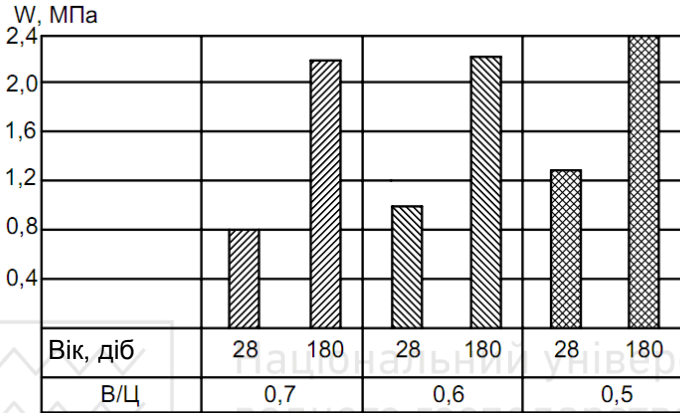


Рис. 2.11. Зміна водонепроникності (W) самоущільнюваних золовмісних бетонів в часі

За даними В.В. Стольнікова [150] при достатньому вологісному режимі твердіння підвищення водонепроникності бетону в пізні терміни твердіння є значно більшим, ніж відносний приріст міцності при стиск. При цьому найбільше збільшення водонепроникності відзначено при інших рівних умовах для бетонів з високими значеннями В/Ц і менше для бетонів з низькими значеннями В/Ц.

З метою визначення впливу ступеня подрібнення золи на проникність був визначений характер пористості зразків самоущільнюваних бетонів з добавкою золи-виносу різної дисперсності, отриманої шляхом домелу.

Параметри порової структури зразків самоущільнюваного бетону представлені в табл. 2.7.



Таблиця 2.7

Параметри порової структури бетонів

№ з/п	S_3 , см ² /г	Відкрита капілярна пористість	Еквівалентний гідравлічний радіус, см	Питома поверхня капілярів, м ² /см ³	Коефіцієнт водонепроникності, см ⁴ /м·с
1	2500	0,137	$2,67 \cdot 10^{-6}$	5,14	$1,57 \cdot 10^{-5}$
2	2900	0,132	$2,23 \cdot 10^{-6}$	5,9	$1,05 \cdot 10^{-5}$
3	3900	0,134	$1,05 \cdot 10^{-6}$	12,7	$0,24 \cdot 10^{-5}$
4	4900	0,123	$1,15 \cdot 10^{-6}$	10,67	$0,26 \cdot 10^{-5}$

Примітка. Витрата цементу для складу 1 – 410 кг/м³, для інших – 360 кг/м³; витрата води для всіх складів – 185 кг/м³, СП – 0,8% від маси цементу

Введення немеленої золи незначно зменшує кількість відкритих капілярних пор в самоущільнюваному бетоні. Зі збільшенням дисперсності золи до $S_3 = 3900$ см²/г загальна кількість капілярних пор також практично не змінюється. Однак введення золи, особливо меленої, призводить до значного зменшення еквівалентного радіуса пор і підвищення значення питомої поверхні пор, що зумовлює зниження проникності бетону. Збільшення дисперсності золи до $S_3 = 4900$ см²/г, не дивлячись на скорочення загальної кількості відкритих капілярних пор, не призводить до подальшого зменшення гідравлічного радіуса і підвищенню питомої поверхні відкритих капілярних пор, чим і пояснюється відсутність додаткового підвищення значення водонепроникності бетону в порівнянні з бетоном, що містить золу з $S_3 = 3900$ см²/г.

Таким чином, для підвищення водонепроникності самоущільнюваного золомісного бетону з добавкою полікарбоксилатного СП є доцільним і достатнім домел золи до $S_3 = 3900...4000$ см²/г.



Морозостійкість. Морозостійкість бетону в значній мірі визначається характером його порової структури. Капілярні пори є основним дефектом будови щільно укладеного бетону, знижує його морозостійкість [76; 123; 166]. За даними Г.І. Горчакова [76] морозостійким вважається бетон з вмістом капілярних пор не більше 5...7%. Крім того, істотно впливають на морозостійкість розміри пор – негативно впливають пори з розміром понад 10^{-5} см.

Отримані результати (рис. 2.12), вказують на підвищену відкриту пористість (понад 10%) самоущільнюваних бетонів і пояснюють можливе зниження їх морозостійкості у порівнянні з традиційними бетонами.

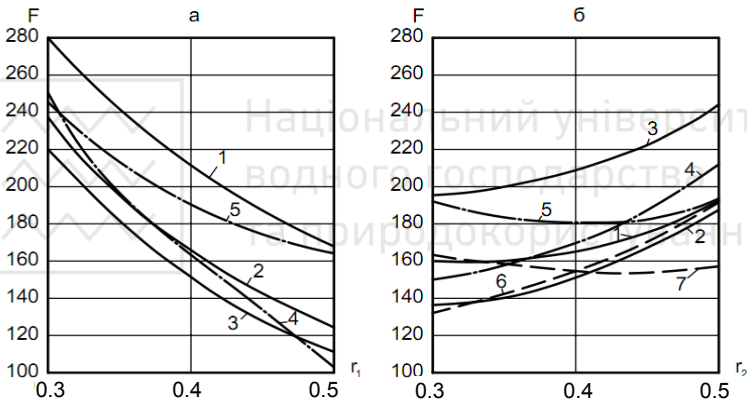


Рис. 2.12. Вплив досліджуваних технологічних факторів на морозостійкість (F) самоущільнюваних золовмісних бетонів (в циклах):

- а – $r_1 = 0,53$; $M_K = 2,4$; $r_2 = 0,2$ та В: 1 – 170 кг/м^3 ; 2 – 180 кг/м^3 ;
3 – 190 кг/м^3 ; В = 180 кг/м^3 ; $r_1 = 0,53$; $M_K = 2,4$ та r_2 : 4 – 0,1; 5 – 0,3;
б – В/Ц = 0,4; $r_1 = 0,53$; $M_K = 2,4$ та В: 1 – 180 кг/м^3 ; 2 – 190 кг/м^3 ;
3 – 170 кг/м^3 ; В/Ц = 0,4; В = 180 кг/м^3 ; $r_1 = 0,53$ та M_K : 4 – 3,4;
5 – 1,4; В/Ц = 0,4; В = 180 кг/м^3 ; $M_K = 2,4$ та r_1 : 6 – 0,61; 7 – 0,45

Добавка золи, незважаючи на незначне скорочення загальної кількості відкритих капілярних пор, призводить до підвищення морозостійкості самоущільнюваного бетону з полікарбоксилатним СП, що є результатом зменшення розміру



пор. Питома поверхня відкритих капілярних пор збільшується, а еквівалентний гідравлічний радіус зменшується (табл. 2.7).

Введення подрібненої до $S_3 = 3900 \text{ см}^2/\text{г}$ золи ще більшою мірою сприяє зменшенню розмірів відкритих капілярних пор і, як наслідок, підвищенню морозостійкості самоущільнюваного бетону з полікарбоксилатним СП. Подрібнення золи до $S_3 = 4900 \text{ см}^2/\text{г}$, не дивлячись на скорочення загальної кількості відкритих капілярних пор (табл. 2.7), не призводить до подальшого зменшення їх розмірів і незначно збільшує морозостійкість самоущільнюваного бетону.

Таким чином, підвищення морозостійкості СУБ при введенні золи у вирішальній мірі пов'язано зі зменшенням розмірів капілярних пор бетону, а не їх кількості. Для підвищення морозостійкості самоущільнюваного золівмісного бетону є доцільним і достатнім домел золи до $S_3 = 3900...4000 \text{ см}^2/\text{г}$.

Експериментально-статистична модель морозостійкості самоущільнюваного золівмісного бетону в циклах отримана відповідно до умов планування табл. 2.4:

$$y_{23} = 165 - 57X_1 - 30X_2 + 16X_7 - 6X_8 + 15X_1^2 + 15X_2^2 - 11X_6^2 + 10X_7^2 - 18X_1X_6 + 17X_1X_7 + 18X_2X_6 + 8X_2X_7 + 11X_2X_8 + 13X_6X_7 + 16X_7X_8. \quad (2.27)$$

Аналіз моделі (2.27) показує, що морозостійкість самоущільнюваного бетону в значній мірі залежить від В/Ц і водовмісту бетонної суміші (рис. 2.12). Збільшення значень як першого, так і другого факторів в результаті підвищення капілярного насичення бетону призводить до зниження морозостійкості бетону.

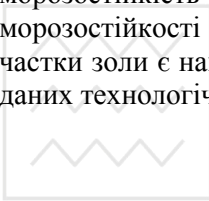
Морозостійкість самоущільнюваного золівмісного бетону істотно залежить від вибору частки золи в об'ємі дрібного заповнювача. При прийнятих умовах планування експерименту вибір частки золи слід здійснювати з урахуванням усіх досліджуваних технологічних факторів.

У загальному випадку, як впливає з моделі (2.27), для підвищення морозостійкості самоущільнюваного бетону частка



золи може бути збільшена (рис. 2.12). Це положення можна пояснити тим, що збільшення частки золи в об'ємі дрібного заповнювача підвищує відношення абсолютного об'єму в'язучого (зола + цемент) до об'єму пор в піску, в результаті чого зменшується товщина водної оболонки, що оточує клінкерні зерна. Відповідно зменшується об'єм пор в бетоні та їх розміри. Цілком ймовірно, це положення справедливе для бетонів, зола в яких характеризується незначним вмістом вуглецевих частинок, тому що підвищення вмісту вуглецевих частинок негативно позначається на морозостійкості бетонів [52; 141].

На підставі аналізу графічних залежностей (рис. 2.12), побудованих за моделлю морозостійкості (2.27), можна зробити висновок, що зі зменшенням V/C , S_3 і M_k позитивний вплив на морозостійкість збільшення τ_2 згасає. Підвищення морозостійкості самоущільнюваного бетону від збільшення частки золи є найбільш відчутним при максимальних значеннях даних технологічних факторів.





РОЗДІЛ III КОМПОЗИЦІЙНІ МАЛОЦЕМЕНТНІ САМОУЩІЛЬНЮВАНІ БЕТОНИ

3.1. Основні напрямки отримання малоцементних композиційних бетонів. Активація наповнювачів

На даний час в будівництві знаходять застосування бетони, що містять найчастіше 200...600 кг/м³ портландцементу. Результати досліджень і практичний досвід показують, що при певних умовах бетони класів В7,5...В25 можуть бути отримані і при витраті цементу менше 200 кг/м³. Такі бетони можна умовно назвати малоцементними [84]. Розглянемо основні напрямки отримання малоцементних бетонів.

Фундаментальним положенням бетонознавства є залежність технічних властивостей бетону від його структури. Остання в свою чергу в значній мірі обумовлена об'ємною концентрацією цементного каменю і його якісними показниками, в першу чергу щільністю і клеючою здатністю.

Відомі формули міцності бетону, встановлені Фере, Абрамсом, Беляєвим, Боломеем, Скрамтаєвим та іншими дослідниками [82], припускають, що витрата цементу повинна забезпечувати заповнення пустот між зернами заповнювача і утворення клейового прошарку необхідної товщини.

За даними П.І.Боженова [72] для заповнення пустот може витратитися понад 60% в'язучого, при цьому активно бере участь у формуванні експлуатаційних властивостей лише менша - плівкова частина в'язучого. Обсяг пустот може регулюватися зміною гранулометричного складу суміші наповнювачів. Є.Н. Леонтьєв [72] показав, наприклад, що при раціонально складеній суміші заповнювачів пустотність зменшується з 29...38 до 19%, що призводить, відповідно, до зменшення сумарного об'єму цементного тіста з 500...337 до 290 л/м³.

Отримання суміші заповнювачів з мінімальною пустотністю є складним практичним завданням, вимагає застосування великої кількості фракцій як крупного, так і дрібного заповнювачів. Тому більш перспективним є



збільшення загальної витрати порошкоподібної частини бетонної суміші за рахунок розбавлення цементу мінеральними наповнювачами. Останні можуть вводитися як в процесі отримання цементу, так і безпосередньо в бетонну суміш.

Як при зменшенні пустотності суміші заповнювачів, так і при розбавленні в'язучого мінеральними наповнювачами вирішальне значення в кінцевому рахунку має досягнення економії портландцементу і, особливо, його клінкерної частини. Запропоновано ряд техніко-економічних критеріїв ефективного використання цементів: витрата цементу або його вартість на одиницю міцності, відношення міцності бетону до витрати цементу, «цементуюча ефективність», коефіцієнт раціонального використання цементу тощо [81]. Більш високе значення ці критерії набувають при розведенні цементу активними наповнювачами, які по суті збільшують об'єм в'язучого в бетоні і активно беруть участь в синтезі міцності та інших технічних властивостей бетону [162]. Так звана цементуюча ефективність, тобто кількість цементу в кг, яку можна замінити одним кілограмом наповнювача, в деяких випадках може перевищувати одиницю [162]. Так, один кг мікрокремнезему - відходу виробництва феросплавів – може замінити 3...5 кг цементу. Цементуюча ефективність золи-винесу коливається в широких межах і за певних умов також може перевищувати одиницю [162].

Зменшення витрат цементного тіста без збільшення жорсткості бетонної суміші з успіхом може бути досягнуто із застосуванням пластифікуючих ПАР, особливо суперпластифікаторів. Найбільш ефективно позначається введення композиції суперпластифікатор – наповнювач, що дозволяє отримати бетони з мінімальною витратою цементу навіть при використанні литих сумішей [80].

Міцність бетону, як відомо, лінійно пов'язана з цементно-водним відношенням, яке визначає щільність цементного каменю в бетоні. Всі технологічні прийоми, спрямовані на зниження витрат води при $C/V = \text{const}$, призводять і до відповідної економії цементу. Найбільш сильним засобом зниження водопотреби бетонної суміші є добавки-



суперпластифікатори, що вводяться з цементом або з водою замішування. Перший спосіб реалізується при застосуванні в'язучих низької водопотреби (ВНВ), другий спосіб є більш поширеним, він застосовується також при використанні тонкомолотих багатокомпонентних цементів (ТМЦ) [116; 155]. Нормальна густина ВНВ досягає 17...18%, що дозволяє економити до 35...40% цементу. У складі ВНВ і ТМЦ може міститися до 70% інертних або активних наповнювачів. Введення з цементом підвищеної кількості суперпластифікаторів дозволяє істотно підвищити ефективність як клінкерної компонента в'язучого, так і наповнювача. Застосування ВНВ і ТМЦ можна віднести до найбільш прогресивних способів отримання малоцементних бетонів. Виробництво цих в'язучих, однак, пов'язане з підвищеними енерговитратами, виділенням токсичних речовин і т.д.

Підвищення міцності бетону зазвичай досягають підвищенням активності цементу і Ц/В. При цьому підвищення Ц/В проводиться в більшості випадків за рахунок збільшення витрати цементу, що далеко не завжди раціонально. Збільшення витрати цементу веде до збільшення товщини клейового шару, що може несприятливо позначатися на його адгезії до поверхні наповнювачів. Рядом дослідників [88] наводяться експериментальні дані про більш високі міцності бетону з меншим вмістом цементу при $C/W = \text{const}$, тобто з меншою товщиною цементної плівки навколо зерен наповнювачів. Т.Ю.Любімова і Е.Р.Пінус, які вивчали мікротвердість по глибині контактної зони, вважають також, що підвищення міцності цементного каменю в контактних шарах на границі з хімічно інертними породами можна вважати практично марним [115].

Відомий ряд способів поліпшення клеючої здатності цементного каменю при обмеженні його вмісту в бетоні. Один з них заснований на концепції, що розглядає цементний камінь як мікробетон [162]. Відповідно до цієї концепції доцільно підвищувати дисперсність цементного клею, забезпечуючи його повну гідратацію. Зерна цементу розміром понад 40 мкм, які практично не гідратуються, раціонально замінювати



наповнювачами. Ця концепція лежить в основі технологій сухого і мокрого домелу цементу спільно з піском та іншими наповнювачами, отримання колоїдного цементного клею [156]. Домел цементу, однак, не набув поширення у зв'язку з високою енергоємністю, недосконалістю конструкції помельних агрегатів, швидкою втратою активності. Застосування колоїдного цементного клею, одержуваного із застосуванням вібраційних млинів і змішувачів, обмежується дуже вузькою областю клейових складів.

Значного розвитку набули дослідження з активації цементного в'язучого, а також суміші цементу з наповнювачами та заповнювачами. Метою активації є підвищення механічної міцності цементного каменю і бетону, інтенсифікація твердіння або скорочення витрати цементу без зниження заданої міцності матеріалу.

Дослідження впливу наповнювачів на структуроутворення і властивості цементних систем виконані, як правило, з урахуванням умов порівняно низьких значень ступеня наповнення $H/C < 1$, де H – витрата наповнювача; C – витрата цементу. Для отримання малоцементних бетонів становить інтерес вивчення особливостей структуроутворення при $H/C > 1$. При високому ступені наповнення актуальною стає завдання поліпшення структуруючої ролі наповнювача, перш за все, за рахунок підвищення його поверхневої активності.

Аналіз досліджень процесів структуроутворення наповнених цементних систем дозволяє вважати, що активність наповнювачів характеризується їх здатністю як до хімічного, так і фізико-хімічного впливу на процеси формування штучного каменю. Хімічна активність наповнювачів в більшості випадків має пуцоланову природу і досить добре вивчена [117]. Значно меншою мірою вивчена здатність наповнювачів брати участь в фізико-хімічних і фізико-механічних процесах організації структури цементних порошків, цементного каменю, розчинів і бетонів [162].

Критерієм фізико-хімічної активності наповнювачів може служити їх поверхнева енергія. Як відомо, визначення поверхневої енергії твердих тіл є досить складним і про її



значення судять побічно за допомогою ряду розрахункових методів або вимірюванням деяких механічних характеристик. В.І. Соломатовим [148] в якості критерію поверхневої активності наповнювачів запропоновано використовувати кислотно-основне відношення поверхневих центрів мінеральних дисперсних речовин. На поверхні однієї і тієї ж частинки можуть одночасно бути присутні кислотні та основні, окисні і відновні центри, що робить поверхню поліфункціональною і здатною взаємодіяти з різними адсорбованими сполуками за різними механізмами.

Таблиця 3.1

Способи активації кремнеземистих наповнювачів і їх вплив на механічні властивості бетонів

Способи активації	Кількість наповнювача від маси цементу, %	Зростання міцності бетонів, %
– домел зі створенням захисних плівок	5...15	125...140
– введення активних присадок для підвищення поверхневої енергії	15...30	130...155
– термообробка до склування	3...18	150
– гідротермальна обробка	30...50	145...165
– гідромеханічна обробка з вапновмісними компонентами	30...40	150...170
– обробка розчинами сильних кислот	10...25	150...165
– обробка гідрофілізуючими ПАР	10...25	115...120
– акустична обробка	≤ 100	140...180
– електродинамічна обробка	≤ 100	150...170

Під активацією наповнювачів розуміють сукупність технологічних прийомів, спрямованих на підвищення їх активності [144]. У найбільшій мірі способи активації розроблені стосовно до цементу. Основними з них є домел,



віброактивація, турбулентна, акустична, ультразвукова, термічна, аеротермічна, електроімпульсна обробка та ін. [144; 148; 162]. Класифікація способів активації наповнювачів і вплив активації на механічні властивості цементних бетонів наведені в роботі [144] (табл. 3.1).

До основних досліджених способів активації наповнювачів відносяться подрібнення (механічний спосіб) і модифікування поверхні частинок мінеральними або органічними добавками (хімічний спосіб). Перспективним можна вважати комбінацію обох способів (механіко-хімічний спосіб) [162].

Суть механічного методу полягає в підвищенні реакційної здатності порошків за рахунок утворення нових активних поверхонь зерен, зміни кристалічної структури мінералів, утворення великої кількості ненасичених валентних зв'язків, а при глибокому подрібненні і їх аморфізації. У випадках, що найбільше зустрічаються, поверхнева енергія наповнювача E_H є нижчою за поверхневу енергію зерен в'язучого E_B ($E_B/E_H > 1$). Відносне співвідношення між розміром частинок наповнювача d_H і зернами в'язучого d_B для цих випадків рекомендується в межах $d_H / d_B = 3 \dots 10$ [162]. Ці рекомендації розроблені на основі уявлень про утворення кластерів і поетапної організації структури композиційного матеріалу. У тих випадках, коли поверхнева активність наповнювача вища поверхневої активності в'язучого, оптимальний розмір часток наповнювача рекомендується рівним розміру зерен цементу [162]. Подальше зменшення діаметра частинок наповнювача збільшує ймовірність їх об'єднання у власні кластерні структури, що призводить до розвитку внутрішніх поверхонь розділу і тріщин. Величина поверхні розділу фаз наповнювач-в'язуче в одиниці об'єму може характеризуватися параметром, пропорційним добутку ступеня наповнення, дисперсності і поверхневої активності наповнювача.

До найбільш ранніх робіт по активації наповнювачів органічними ПАР можна віднести роботи М.І.Хігеровіча і Н.В.Нікітіна по активації карбонатного наповнювача милонафтом [161].



Для активації наповнювачів застосовували [108] мікродози органічних речовин, достатні лише для покриття окремих ділянок поверхні частинок твердої фази. Всього 0,0006...0,001% етонію виявилось достатнім при активації частинок карбонатного наповнювача і меленого піску, щоб міцність цементно-піщаного розчину зросла на 25...30%.

Найбільш значущі роботи по модифікації поверхні зерен органічними речовинами виконані В.І.Соломатовим і його школою [148]. Розроблено склади і технологія введення в бетонні суміші полімермінеральних наповнювачів, для активації піску рекомендовані полізоціаніт, епоксидна смола, поліетиленполіамін, фурфуролакарбамідні і поліефірні смоли.

В роботі Е.Н.Хохріної [148] в якості активаторів меленого піску досліджені мінеральні та органічні добавки 21-го виду, в тому числі анілін, фурфурол, кубові залишки синтетичних жирних кислот і ін. В якості основного активатора використаний анілін. При механо-хімічній активації кварцового і зольного наповнювачів показана ефективність добавки суперпластифікатора С-3 [162].

Роль найбільш активних наповнювачів можуть виконувати ультрадисперсні порошки т.зв. мікрокремнезему, що вловлюються при газоочищенні на ряді металургійних виробництв, наприклад, при виробництві феросплавів. Ефективність мікрокремнеземів як активних наповнювачів бетонів показана в багатьох роботах [70; 89; 130]. Ці роботи виконані, як правило, для бетонів з відносно високою витратою цементу. Унікальна питома поверхня (до 2000 м²/кг) в поєднанні з аморфізованою структурою частинок кремнезему, наявністю таких домішок, як карбід кремнію, які володіють високою поверхневою енергією, обумовлюють найбільшу структуруючу і реакційну здатність цих ультрадисперсних матеріалів в порівнянні з іншими наповнювачами цементних систем.

В той же час, мікрокремнезему є достатньо дорогими наповнювачами. Їх вартість може на порядок перевищувати вартість цементу. Тому, актуальним питанням є знаходження альтернатив мікрокремнезему, в якості ефективного наповнювача для литих та самоущільнюваних бетонів.



В даний час одним з ефективних наповнювачів для цементних систем визнаний метакаолін – високодисперсний алюмосилікат, що володіє пуцолановою активністю, що утворюється в результаті випалу каолінових глин в температурному діапазоні $650-750^{\circ}\text{C}$ [111]. Додавання метакаоліну сприяє збільшенню міцності цементного каменю, адгезії цементного гелю до частинок заповнювача, зниженню пористості і зменшенню проникності, підвищенню стійкості матеріалу до циклічного замерзання відтавання, а також до корозійних впливів. Вплив метакаоліну на гідратацію цементу і формування структури цементного каменю обумовлений високою дисперсністю частинок і його пуцолановими властивостями [86; 170]. Однак, дана мінеральна добавка відрізняється високою дисперсністю, що призводить до зростання водопотреби цементних систем. Для зниження цього негативного фактора необхідно використовувати суперпластифікатори, що відрізняються високим водоредукуючим ефектом [95; 99].

Кам'яновугільні кислі золи-виносу відносяться до числа найбільш поширених і порівняно добре вивчених мінеральних наповнювачів – цементних бетонів [81; 100; 141; 162]. Пуцоланова активність золи-виносу порівняно невелика (10...50 мг СаО/г), вона залежить в основному, від вмісту і складу склоподібної фази, а також дисперсності [100; 141]. За даними А.М. Сергєєва [141] активність зол-виносу Придніпровської ГРЕС склала близько 30 мг/г, а після подрібнення до повного проходження крізь сито № 008 – 63 мг/г. Настільки тонке подрібнення золи, як спосіб підвищення активності, однак, досить енергоємний і важко реалізований.

Великою перевагою зол-виносу як наповнювачів цементних бетонів є їх низька водопотреба. Введення в бетонну суміш золи на відміну від інших активних мінеральних добавок не погіршує, а, як правило, покращує легкоукладальність [162].

В якості одного із способів активізації золи-виносу можна розглядати поєднання її з такими високоактивними ультрадисперсними продуктами як метакаолін (МК). Результати



перших дослідів по визначенню спільного впливу МК і золи-виносу на міцність бетону наведені в роботі [86].

Можна припустити, що композиційні зола-метакаолинові наповнювачі (ЗМКН) повинні володіти з одного боку підвищеною пуццолановою активністю і поверхневою енергією, а з іншого – в комплексі з ефективним суперпластифікатором, помірною водопотребою, високою рухомістю суміші із здатністю до самоущільнення а також забезпечувати довготривале зростання міцності, що особливо важливо для малоцементних бетонів.

3.2. Властивості бетонних сумішей з зола-метакаолиновим наповнювачем

Водопотреба Істотний вплив складу і об'ємної концентрації зола-метакаолинових наповнювачів (ЗМКН) на реологічні властивості цементно-водних паст позначається на легкоукладальності і водопотребі бетонних сумішей. В табл. 3.2 наведені експериментальні дані, що характеризують взаємозв'язок між показниками легкоукладальності наповнених бетонних сумішей і їх водопотребою. Дані отримані при використанні піску середньої крупності з водопотребою 7,5% ($M_{кр} = 2,45$) і гранітного щебеню крупністю 5...20 мм при витраті цементу 150 кг/м³. У бетонних сумішах приймали однакову об'ємну концентрацію ЗМКН в наповненому в'язучому.

Об'ємну концентрацію метакаоліну (МК) в ЗМКН (X_1) змінювали від 0 до 1. При визначенні складів використаних в дослідях бетонних сумішей витрата МК і золи-виносу (3) знаходили за формулами:

$$MK = X_1 X_2 V_{н.в.} \cdot \rho_{МК}; \quad (3.1)$$

$$3 = (V_n - X_1 \cdot X_2 \cdot V_{н.в.}) \rho_3, \quad (3.2)$$

де $\rho_{МК}$ і ρ_3 – густини МК і золи в кг/м³;

V_n – об'єм наповнювача (при $X_2 = 0,45$; $\Pi = 150$ кг/м³);

$V_n = 0,046$ м³);

$V_{н.в.}$ – об'єм наповненого в'язучого ($V_{н.в.} = 0,094$ м³).



Таблиця 3.2

Взаємозв'язок між показниками легкоукладальності
і водопотреби бетонних сумішей, наповнених ЗМКН

Рухомість суміші, см	Водопотреба, кг/м ³ при $x_2=0,45$; $\Pi=150$ кг/м ³			
	$X_1=0$	$X_1=0,2$	$X_1=0,4$	$X_1=1$
24...28	215/200	235/215	255/235	280/255
18...23	205/190	225/205	245/225	270/245
11...17	195/183	210/195	230/210	250/230
5...10	185/175	200/185	215/200	235/215

Примітки: 1. Під рискою витрата води при застосуванні суперпластифікатора Melflux 2651f в кількості 1% від маси цементу.
2. У табл. 3.9 і в подальшому наведені експериментальні дані з використанням портландцементу ПЦ-1, золи-виношення З-1 і метакаоліну МК-1.

Розрахувавши об'єми цементу (V_{Π}), МК ($V_{МК}$) і золи-виносу (V_3), знаходимо обсяг заповнювачів ($V_{зап}$) з умови:

$$V_{зап} = 1 - (V_{\Pi} + V_{МК} + V_3 + V_6) \text{ або } V_{зап} = 1 - (0,094 + V_6), \quad (3.3)$$

де V_6 – витрата води в м³/м³.

При визначенні співвідношення між піском і щебенем використовували відому формулу [64], що враховує коефіцієнт розсуву зерен в залежності від об'єму цементного тіста, допускаючи, що вона справедлива і для наповненого цементного тіста.

Аналіз даних табл. 3.2 показує, що водопотреба бетонних сумішей істотно зростає з підвищенням об'ємної концентрації МК в ЗМКН. Особливо це відчувається в високорухомих самоущільнюваних сумішах. Так, при ОК = 24...28 см збільшення X_1 до 0,2; 0,4 і 1 веде до зростання водопотреби відповідно на 9,3; 18,6 і 30,2%, при ОК = 5...10 см він становить 8,1; 16,2 і 27%. Введення суперпластифікатора Melflux, як і слід було очікувати, викликає найбільш значне зниження водопотреби в сумішах з найбільшим водовмістом. Воно досягає 20...25 л/м³ при водовмісті понад 220 л/м³. У той же час характерно, що



розріджуюча для суперпластифікатора при однаковому або близькому водовмісті посилюється в сумішах з МК.

Можна припустити, що висока дисперсність МК сприяє вибірковій адсорбції ПАР на його частинках і переведення структури бетонної суміші з коагуляційної в пептизаційну.

У дослідах, наведених в табл. 3.2, витрата МК і золиноносу змінювалась в межах від 0 до 125 кг/м³. Загальна ступінь наповнення бетонів, яка характеризується параметром X_2 , була постійною ($X_2 = 0,45$). У табл. 3.3 наведені експериментальні дані водопотреби бетонних сумішей при різних ступенях наповнення ($X_2=0,2...0,7$). Витрату ЗМКН змінювали від 37 до 350 кг/м³, при цьому витрата МК відповідала $X_1 = 0,2$ (тобто коливалась від 7,4 до 70 кг/м³).

Збільшення об'ємної концентрації ЗМКН при порівняно невисокому вмісті МК в меншій мірі позначається на водопотребі сумішей.

Таблиця 3.3

Взаємозв'язок між показниками легкоукладальності і водопотреби бетонних сумішей при різному ступені наповнення ЗМКН

Рухомість суміші, см	Водопотреба, кг/м ³ при $X_1=0,2$ $\rho=150$ кг/м ³			
	$X_2=0,2$	$X_2=0,4$	$X_2=0,5$	$X_2=0,7$
24...28	220/205	230/210	240/220	260/235
18...23	210/195	220/205	230/210	250/225
11...17	200/185	205/195	215/200	235/210
5...10	190/175	195/180	205/185	230/205

Примітка: Під рисою наведені значення водопотреби для бетонних сумішей з добавкою Melflux 2651f 1% від маси цементу.

Для наповнених бетонних сумішей збільшення X_2 з 0,2 до 0,7 вимагає збільшення водопотреби на 30...40 л, тобто на 17...18%. При цьому для малорухомих зростання X_2 від 0,2 до 0,5, тобто вмісту ЗМКН від 37 до 150 кг/м³ обумовлює підвищення водопотреби на 7,8...8,8%. Подальше підвищення X_2 від 0,5 до 0,7, тобто вмісту ЗМКН від 150 до 350 кг/м³, вимагає для підтримки рівної легкоукладальності ще близько 10% води.



Оцінюючи результати дослідів, що наведені в табл. 3.3, слід враховувати знижену водопотребу золи-виносу – основного компонента ЗМКН при об'ємній концентрації МК, рівній 0,2, а також помірну загальну витрату наповненого в'язучого (від 180 кг/м³ при $X_2 = 0,2$ до 500 кг/м³ при $X_2 = 0,7$).

Легкоукладальність. Зберігання бетонних сумішей визначається впливом температурно-часового фактора на їх водопотребу і легкоукладальність. Наповнення бетонних сумішей ЗМКН при обмеженому вмісті цементу, як впливає з табл. 1.12, істотно впливає на темп падіння рухливості. Збільшення об'ємної концентрації МК помітно сильніше впливає на темп падіння рухливості, особливо при об'ємній концентрації МК в ЗМКН (X_1) понад 0,4. Без суперпластифікатора і навіть при помірному його вмісті ($X_c \leq 0,01$) самоущільнювані бетонні суміші (ОК = 24...28 см) при $X_1 > 0,2$ вже через 0,5 год переходять в середньорухливі або малорухливі. Значний ефект в стабілізації рухливості наповнених бетонних сумішей досягається при підвищеній концентрації суперпластифікатора.

Для кількісної оцінки впливу чинників складу наповненого в'язучого на легкоукладальність малоцементних бетонних сумішей виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до плану Na_5 . В якості планованих факторів обрані:

$$X_1 = v_{МК} / (v_{МК} + v_3); \quad X_2 = (v_{МК} + v_3) / (v_{МК} + v_3 + v_{Ц});$$

$$X_3 = (v_{МК} + v_3 + v_{Ц}) / (v_{МК} + v_3 + v_{Ц} + v_{В});$$

$$X_4 = (v_{МК} + v_3 + v_{Ц} + v_{В}) / (v_{МК} + v_3 + v_{Ц} + v_{В} + v_{зап});$$

$$X_c = v_c / (v_c + v_{В}), \quad (3.4)$$

де $v_{МК}$, v_3 , $v_{Ц}$, $v_{В}$, $v_{зап}$, v_c – відповідно об'єми МК, золи, цементу, води, заповнювачів, суперпластифікатора.



Таблиця 3.4

Зміна рухливості бетонних сумішей з ЗМКН в часі

Фактори складу бетонних сумішей ($\rho=150 \text{ кг/м}^3$; $x_2=0,45$)			Рухомість, ОК в см через, хв після заповнення конуса			
X_1	$B, \text{ кг/м}^3$	Melflux 2651f, %	10	30	50	70
0	215	0	25	15	10	3
0	205	0,5	26	16	7	2
0	200	1	27	17	9	1
0,2	235	0	25	14	6	3
0,2	225	0,5	27	16	9	1
0,2	215	1	28	18	8	2
0,4	255	0	26	12	6	2
0,4	245	0,5	27	14	9	3
0,4	245	1	28	15	10	3
1	280	0	25	11	9	1
1	270	0,5	26	11	8	2
1	255	1	28	13	7	2

Вибір в якості планованих 4-х концентраційних факторів (X_1, X_2, X_3 і X_4), представлених об'ємними співвідношеннями, дозволяє: по-перше, простежити вплив на досліджувану властивість 5 параметрів складу витрат МК, золи-винесення, цементу, води і заповнювачів (за умови $v_{МК}+v_3+v_{ц}+v_в+v_{зап}=1$, фактор X_5 характеризує вплив витрати суперпластифікатора), по-друге, застосувати поліструктурний метод технологічного аналізу, враховуючи, що кожен наступний фактор характеризує більш складний структурний рівень елементів бетонної суміші, ніж попередній.

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

$$v_{МК} = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4; \quad МК = v_{МК} \rho_{МК}; \quad (3.5)$$



$$v_3 = (1 - X_1) \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4; \quad Z = v_3 \rho_3; \quad (3.6)$$

$$v_4 = (1 - X_2) \cdot X_3 \cdot X_4; \quad Ц = v_4 \rho_4; \quad (3.7)$$

$$v_6 = (1 - X_3) \cdot X_4; \quad B = v_6 \rho_6; \quad (3.8)$$

$$v_{zan} = 1 - X_4; \quad Zan = v_{zan} \rho_{zan}. \quad (3.9)$$

При розрахунку за формулами (3.5-3.9) приймали $\rho_{mk}=2100$, $\rho_3=2200$, $\rho_4=3100$, $\rho_6=1000$, $\rho_{zan}=2650$ кг/м³.

Встановивши загальну витрату заповнювачів, за допомогою відомих рекомендацій [64] знаходили витрату дрібного і крупного заповнювачів. При введенні суперпластифікатора витрату води коректували з урахуванням табл. 3.3.

В табл. 3.5 наведені умови планування експериментів при вивченні впливу зазначених вище факторів на розплив конусу самоущільнюваної бетонної суміші з ЗМКН.

Таблиця 3.5

Умови планування експериментів

Фактори	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
X ₁	0	0,5	1	0,5
X ₂	0,25	0,40	0,55	0,15
X ₃	0,40	0,50	0,60	0,10
X ₄	0,25	0,265	0,28	0,015
X _c	0	0,01	0,02	0,01

В області варіювання факторів витрата МК коливається від 0 до 194 кг/м³, золи від 0 до 203, цементу від 139 до 338, води від 100 до 168 кг/м³.

Обробка експериментальних даних дозволила отримати математичну модель розплив конусу самоущільнюваної бетонної суміші, наповненої ЗМКН (см):



$$Y_4 = 58,5 + 32,4 x_1 + 24,5 x_2 + 7,6 x_3 - 28,2 x_4 - 20,5 x_c + 8,5 x_1^2 - 5,6 x_2^2 + 7,5 x_3^2 + 6,8 x_4^2 + 6,2 x_c^2 - 14,3 x_1 x_2 - 7,4 x_2 x_c + 18,8 x_1 x_2. \quad (3.10)$$

Аналіз моделі дозволяє констатувати, що об'ємна частка МК в ЗМКН є найсильнішим чинником, що визначає розплив наповненої бетонної суміші, при цьому стрімке падіння розпливу має місце при $X_1 > 0,5$ і, особливо, в сумішах з пониженим вмістом суперпластифікатора або без нього. Звертає увагу наявність в моделі сильних ефектів взаємодії між факторами X_1 і X_2 , X_1 і X_c , що вказують на необхідність тісного взаємозв'язку при призначенні складів самоущільнюваних бетонних сумішей, витрат МК, золи і суперпластифікатора. При одній і тій же об'ємній концентрації цементного тіста в бетонній суміші ($X_4=0$) зміна складу наповненого тіста при максимальному вмісті суперпластифікатора в межах області варіювання викликає зміну розпливу від 40 до 65 см.

Характерно, що в межах $X_3 = 0,3 \dots 0,4$ розплив бетонної суміші практично не змінюється, подальше підвищення об'ємної частки в'язучого в наповненому цементному тісті зменшує розплив. Розрахунки за формулами (3.5-3.9), показують, що при $X_3 = 0,3 \dots 0,4$ в'язуче-водне відношення наповненої бетонної суміші не перевищує 2, тобто має бути справедливим правило сталості водопотреби [64].

Відома [64] залежність коефіцієнта розсуву зерен і, відповідно, показників легкоукладальності бетонної суміші від об'єму цементного тіста. З моделі розпливу також випливає, що, наприклад, при фіксуванні інших факторів на основному рівні зміна X_4 від -1 до +1 викликає зміну розпливу від 58 до 37 см. Значно більші коливання розпливу можливі при спільній зміні факторів X_4 і X_3 , що характеризують вплив як кількості цементного тіста, так і його в'язкості, обумовленої вмістом в тісті наповненого в'язучого.

У моделі розпливу не враховується вплив особливостей якісних показників вихідних матеріалів. Із сукупності цих показників один з ведучих – водопотреба піску. Спеціально поставлені досліди показали, що введення ЗМКН і зміна його



складу не позначається відчутно на характері впливу водопотреби піску на водопотребу бетонної суміші і, відповідно, на легкоукладальність.

Водовідділення і розшаровуваність сумішей.

Водовідділення – результат седиментаційного ущільнення і осадження твердих частинок бетонної суміші, викликаного їх різною густиною. Воно зумовлене водоутримуючою здатністю в'язучого і окремих його компонентів, а також залежить від водоутримуючої здатності наповнювачів та їх співвідношення в суміші [80].

З огляду на високу дисперсність МК і ЗМКН, можна очікувати, що наповнені бетонні суміші повинні мати підвищену водоутримуючу здатність. У бетонних сумішах можливо як і внутрішнє, так і зовнішнє розшарування. Перше обумовлено дією сили тяжіння і зменшується в міру збільшення в'язкості розчинної частини і зменшення крупності зерен заповнювачів. Друге виникає в результаті недостатнього зчеплення щебеню і розчинної складової, що може бути обумовлено надмірно високою в'язкістю останньої або підвищеним вмістом щебеню. Очевидно, в бетонних сумішах, наповнених МК і ЗМКН, при певних умовах можуть створюватися передумови для зовнішнього розшарування або розчиновідділення.

Водовідділення бетонних сумішей визначали після їх відстоювання в циліндричній посудині і характеризували кількістю води, яка відокремилась. Розшаровуваність (розчиновідділення) знаходили в % за ДСТУ Б В.2.7-114. При цьому ущільнення суміші проводили 20-кратним струшуванням шляхом підйому форми на 1 см і її скиданням, після чого суміш піддавали віброущільненню протягом 5 с.

Для водо- і розчиновідділення вивчали вплив тих же технологічних факторів, що і для легкоукладальності бетонної суміші. Умови планування експериментів наведені в табл. 3.5. Обробка отриманих даних в результаті реалізації експериментів за планом Na_5 дозволила отримати математичні моделі водовідділення Y_5 і розчиновідділення Y_6 :



$$Y_5 = 4,15 - 0,95 x_1 - 0,51 x_2 + 0,2 x_3 - 0,17 x_4 - 0,46 x_c - \\ - 0,23 x_1^2 + 0,19 x_2^2 - 0,21 x_3^2 - 0,15 x_4^2 - 0,18 x_c^2 - \\ - 0,35 x_1 x_2; \quad (3.11)$$

$$Y_6 = 5,65 - 0,61 x_1 - 0,82 x_2 + 0,18 x_3 - 0,21 x_4 - 0,7 x_c - \\ - 0,85 x_1^2 + 0,31 x_2^2 - 0,25 x_3^2 - 0,21 x_4^2 - 0,35 x_c^2 + \\ + 0,24 x_1 x_2. \quad (3.12)$$

Вплив об'ємної концентрації МК в ЗМКН (X_1), як можна бачити з аналізу моделей Y_5 і Y_6 , неоднаково позначається на водовідділенні і розшаруванні бетонної суміші (рис. 3.1). Якщо збільшення X_1 у всьому інтервалі значень, підвищуючи в'язкість цементного тіста, призводить до зниження водовідділення, то розчиновідділення, зменшуючись при зростанні X_1 , потім починає збільшуватися. У меншій мірі, ніж X_1 зменшує водовідділення зростання значень інших варіюваних концентраційних факторів за винятком об'ємної концентрації суперпластифікатора у водному розчині затворювача. Збільшення останнього сприяє суттєвому збільшенню водовідділення, що узгоджується з відомим механізмом розріджувальної дії суперпластифікаторів.

Більш складний характер має вплив концентраційних факторів, що характеризують різні структурні рівні наповненої бетонної суміші, на розчиновідділення. Збільшення об'ємної концентрації ЗМКН у в'язучому знижує розчиновідділення. При незмінних значеннях X_1 , X_3 і X_4 збільшення X_2 означає зростання витрат золи, що в умовах обмеженої витрати цементу повинно перешкоджати розшаруванню бетонної суміші. Добавка суперпластифікатора також знижує розчиновідділення, очевидно за рахунок поверхневої активності і відповідно додаткового повітровтягування. Порівняно незначно в прийнятій області варіювання впливають на розчиновідділення, як випливає з рівняння 3.26, фактори X_3 і X_4 , тобто об'ємні концентрації в'язучого в наповненому цементному тісті і тіста в бетонній суміші.

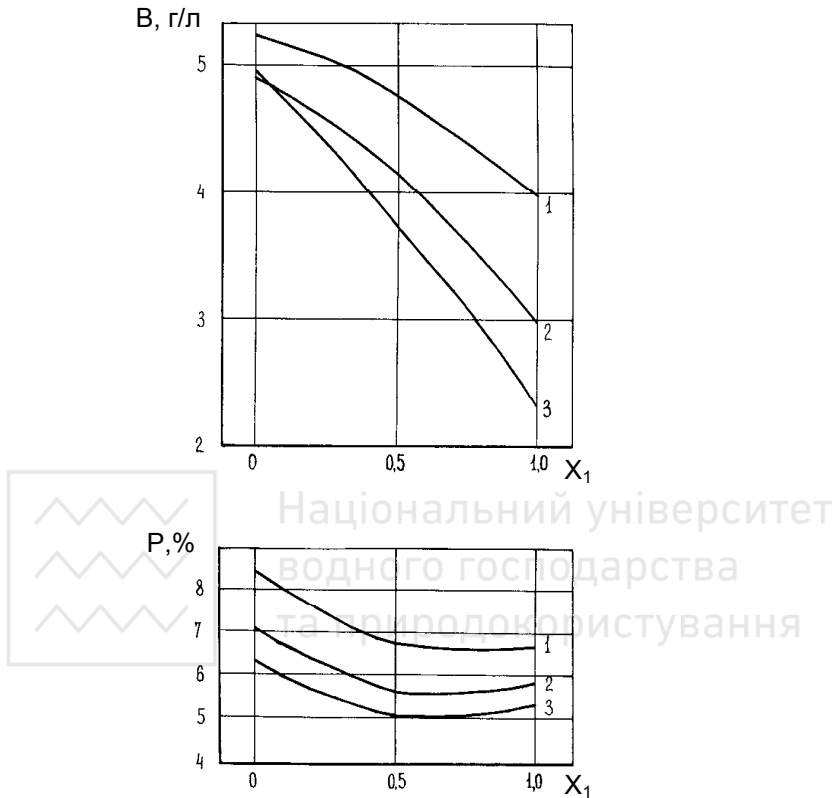


Рис. 3.1. Вплив на водовідділення (B) і розчиновідділення (P) самоущільнюваних бетонних сумішей з ЗМКН факторів складу:
1 – $X_c = 0,02$; 2 – $X_c = 0,01$; 3 – $X_c = 0$
($X_2 = 0,40$; $X_3 = 0,50$; $X_4 = 0,01$)

У моделях як водо-, так і розчиновідділення відзначаються значущі ефекти взаємодії факторів X_1 і X_2 . У першому випадку цей ефект означає, що додаткове зниження водовідділення можна досягти, якщо знак зміни вказаних факторів однаковий, у другому – розчиновідділення – якщо протилежний.



Розрахунки за моделями (3.11, 3.12) показують, що для бетонних сумішей, наповнених ЗМКН, можна досягти в певній області складів практично незначних величин водо- і розчинивідділення.

3.3. Фізико-механічні властивості бетону з золо- метакаоліновим наповнювачем

Міцність бетону. Істотний вплив ЗМКН на активність цементного в'язучого, встановлене раніше, дає підставу припускати про істотну участь його в синтезі міцності бетону. При вивченні впливу ЗМКН на активність цементу враховували вплив факторів X_1 , X_2 і X_3 . Однак для бетону, крім факторів, що визначають склад в'язучого, не менш важливо враховувати якість наповнення цементного тіста і, перш за все, водо-в'язуче чи в'язуче-водне відношення. Відомий в бетонознавстві закон водо-цементного відношення припускає, що, починаючи з деякого мінімально необхідного для створення щільної структури об'єму цементного тіста, подальше його підвищення до певної межі мало впливає на міцність бетону. Разом з тим для малоцементних бетонів при $C < 200 \text{ кг/м}^3$ це питання не можна вважати достатньо вивченим.

На думку А.М.Невілля [123] співвідношення між заповнювачем і цементом є другорядним фактором для міцності бетону особливо середніх і низьких марок, однак, встановлено, що при постійному В/Ц більш пісні суміші мають більш високі міцності. При цьому висловлюється припущення, що ця тенденція пов'язана з поглинанням води заповнювачем, більша кількість заповнювача поглинає велику кількість води і ефективно водо-цементне відношення зменшується. З цих же позицій можна припустити зменшення міцності бетону зі збільшенням об'ємної концентрації цементного тіста, ґрунтуючись на уявленнях про т.зв. «істинне водоцементне відношення» бетону [64].

Вивчали вплив на міцність бетону при стиску після пропарювання і нормального твердіння у віці 28 діб, факторів $X_1 \dots X_4$, що характеризують основні рівні структури і складу



бетонів, наповнених ЗМКН, а також фактора X_c – об'ємної концентрації суперпластифікатора у водному затворювачі.

Вихідними матеріалами були портландцемент ПЦ-I 500, пісок середньої крупності з $V_p = 7.5\%$, гранітний щебінь фракції 5...10 мм. Суперпластифікатором служила добавка Melflux 2651f. В якості основних компонентів ЗМКН застосовували золу-виносу 3-1 і метакаолін МК-1. Виготовляли зразки-куби з розміром ребра 10 см. Пропарювання проводили в лабораторній пропарювальній камері за режимом (2) +3 +6 +2 при 80°C . Зразки випробовували через 0.5 години після охолодження. Досліди проводили відповідно до факторного плану Na_5 . В результаті обробки експериментальних даних отримані математичні моделі міцності пропареного бетону Y_7 і бетону нормального твердіння Y_8 .

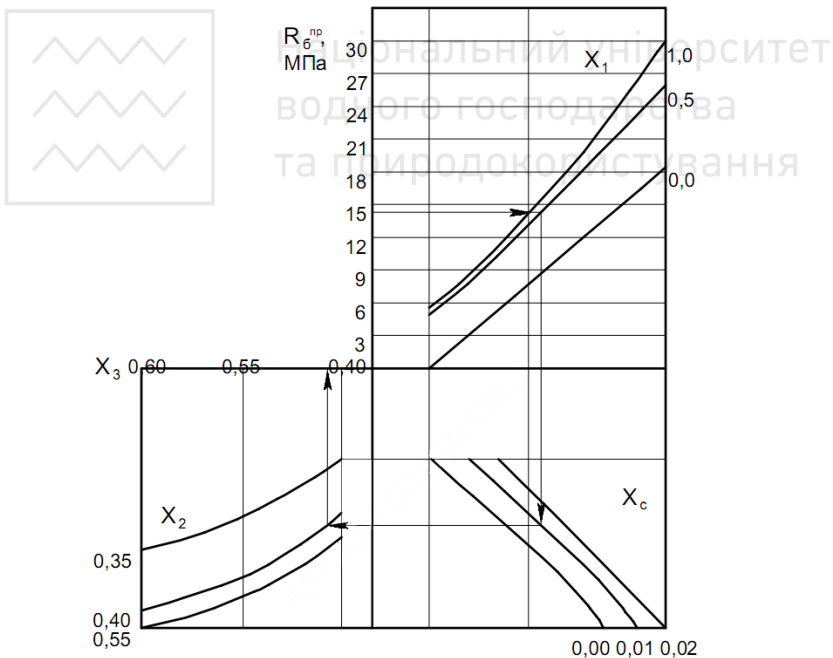


Рис. 3.2. Номограма міцності пропареного бетону з ЗМКН



Моделі міцності бетону Y_7 та Y_8 дозволяють проводити інтерполяційні розрахунки, оцінювати можливість стабілізації і регулювання межі міцності бетону при стиску як після пропарювання, так і через 28 днів нормального твердіння при зміні варійованих технологічних факторів. Такі розрахунки зручно проводити за допомогою номограм (рис. 3.2, 3.3).

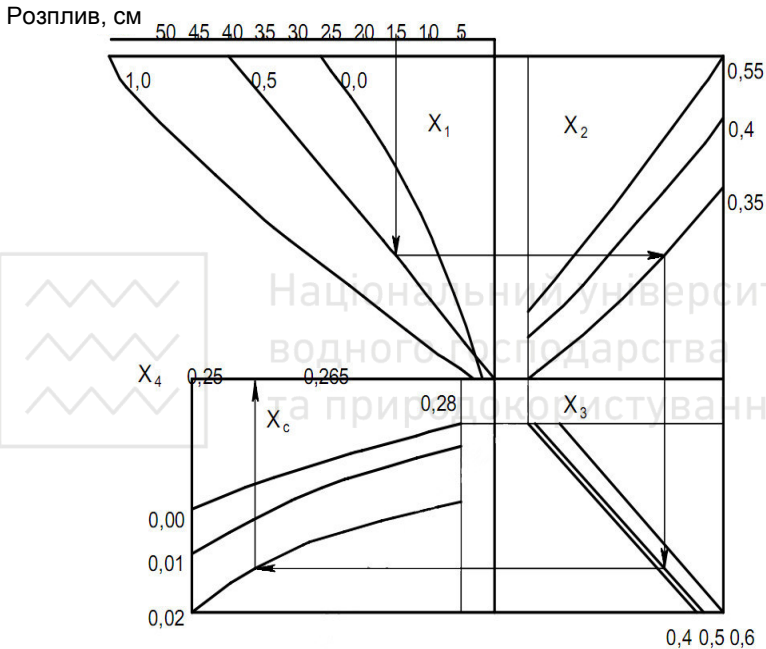


Рис. 3.3. Номограма розпливу самоущільнюваної бетонної суміші з ЗМКН

Для оцінки впливу складу і кількості ЗМКН на зміну міцності бетону в часі проведені спеціальні дослідження. Зразки-куби $10 \times 10 \times 10$ см тверднули в нормальних умовах. За результатами випробувань розраховували коефіцієнти зростання міцності бетону в часі, наведені в табл. 3.6.



Зростання міцності бетонів з ЗМКН в часі

Фактори складу бетонної суміші					Коефіцієнти зростання міцності бетону в часі, через днів			
X_1	X_2	X_3	X_4	X_c	7	28	90	180
1	0.45	0.40	0.35	0.01	0.78	1.00	1.07	1.10
0	0.45	0.40	0.35	0.01	0.65	1.00	1.14	1.21
0.5	0.7	0.40	0.35	0.01	0.77	1.00	1.15	1.21
0.5	0.2	0.40	0.35	0.01	0.78	1.00	1.07	1.11
0.5	0.45	0.5	0.35	0.01	0.80	1.00	1.09	1.14
0.5	0.45	0.3	0.35	0.01	0.77	1.00	1.06	1.15
0.5	0.45	0.40	0.5	0.01	0.79	1.00	1.14	1.20
0.5	0.45	0.40	0.2	0.01	0.78	1.00	1.07	1.14
0.5	0.45	0.40	0.35	0.02	0.65	1.00	1.08	1.15
0.5	0.45	0.40	0.35	0	0.75	1.00	1.12	1.15

Для порівняння визначили коефіцієнти наростання міцності ненаповненого бетону з витратою цементу 180 кг/м^3 при Ц/В = 1. Вони виявилися рівні: 0.65; 1.00; 1.07; 1.10.

Введення МК до складу бетонних сумішей прискорює твердіння бетону в 7-добовому віці практично не позначаючись на зростанні міцності в 90- і 180-добовому віці. При цьому збільшення об'ємної концентрації МК в ЗМКН більше 0.5 не позначається практично на темпі зростання міцності. Більш високий темп зростання міцності бетону у віддалені терміни твердіння відзначається при підвищеному вмісті зольного наповнення.

Пористість і водопоглинання. Золо-метакаолінові наповнювачі (ЗМКН), активно впливаючи на процеси гідратації і структуроутворення цементно-водних систем, вносять істотний внесок в синтез міцності цементно-піщаного розчину і бетону.

Міцність, як і весь комплекс будівельно-технічних властивостей бетону, знаходиться в тісному взаємозв'язку з



параметрами його порового простору [123].

Для дослідження порової структури наповнених бетонів використовували методику [167], основувану на аналізі кінетики водонасичення бетону. Досліди проводилися на зразках розміром 7x7x7 см, виготовлених з портландцементу ПЦ-1, золи-виносу З-1, метакаоліну МК-1, кварцового піску з водопотребою $V_p = 7,5\%$, гранітного щебеню фракції 5...10 мм. В бетонні суміші вводили суперпластифікатор Melflux 2651f. Склади зразків наведені в табл. 3.7. Розрахунки складів виконані за формулами 3.5 – 3.9 і [64].

Таблиця 3.7

Склади бетону для визначення пористості

№ пп	Параметри структури		Склад бетонної суміші в кг/м ³					
	X ₁	X ₂	МК	З	Ц	В	П	Щ
1	0	0	-	-	403	132	570	1120
2	0	0,6	-	175	164	132	630	1115
3	0,2	0,6	33	140	164	132	620	1125
4	0,5	0,6	83	87	164	132	600	1150
5	1	0,6	167	-	164	132	580	1170
6	0,5	0,4	56	58	246	132	620	1140
7	0,2	0,4	22	93	246	132	620	1120

Примітка: значення X₃, X₄ і X_С прийняті відповідно 0,5; 0,265 і 0,01.

У сукупність досліджуваних бетонів, як впливає з табл. 3.7, увійшли малоцементні бетони ($\rho < 200$ кг/м³), наповнені зольним, метакаоліновим і композиційним (ЗМКН) наповнювачами. Для порівняння також взяті бетони з помірною витратою цементу без наповнювача та з ЗМКН.

Відповідно до методики [167] для характеристики порового простору бетону можна скористатися кривими водопоглинання бетону, припускаючи, що цей процес підпорядковується експоненціальній залежності виду:



$$W_{\tau} = W_{\max} (1 - \exp(-\lambda, \tau)^{\alpha}), \quad (3.13)$$

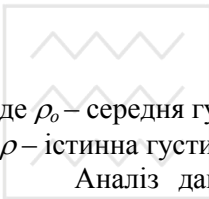
де W_{τ} – водопоглинання зразка за час τ ;

W_{\max} – максимальне водопоглинання;

λ – коефіцієнт, рівний границі відношення прискорення до швидкості процесу поглинання води (ефективний радіус капілярів);

α – коефіцієнт однорідності капілярів за радіусами.

Визначення водопоглинання проводили зважуванням зразків через 0,25 ($W_{0,25}$), 1 (W), 6 (W_6) і 24 год (W_{24}) після початку дослідів. По кривим водопоглинання, що характеризують відкриту пористість і номограмі [167] знаходили параметри λ і α (табл. 3.8). Загальну або інтегральну пористість бетону визначали за формулою:



$$P = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot 100, \quad (3.14)$$

де ρ_0 – середня густина висушених зразків;

ρ – істинна густина матеріалу.

Аналіз даних табл. 3.8 показує, що найбільш істотне зниження відкритої пористості, середнього радіуса пор і показника α бетону спостерігається при об'ємній концентрації МК в ЗМКН (X_1) 0,5. При цьому ступінь наповнення в'язучого, яка характеризується параметром X_2 , становить 0,4. Однак відмінність у величині відкритої пористості, показниках λ і α для бетонів з $X_1 = 0,2$; $X_2 = 0,6$; $X_1 = 0,5$; $X_2 = 0,6$ і $X_1 = 0,5$; $X_2 = 0,4$ невелика. Повна заміна золи метакаліном не призводить до додаткового зменшення відкритої пористості і середнього розміру пор, а також підвищення однорідності розподілу пор за розмірами. Очевидно, полізернової склад ЗМКН, його активна участь в процесах гідратації і структуроутворення на всіх основних етапах твердіння бетону зумовлюють і його перевагу з позицій структури порового простору бетону перед наповнювачем, що складається тільки з МК. З отриманими значеннями параметрів порової структури бетонів, наповнених ЗМКН, узгоджуються і розглянуті раніше особливості зміни міцності бетонів.



Основні параметри порової структури бетонів

Параметри структури бетону ($X_3=0,5$; $X_4=0,265$; $X_c=0,01$)		Пористість, %		Показник середнього розміру пор, λ	Показник однорідності пор за розмірами, α
X_1	X_2	Інтегральна Π	Відкриття, W_{max}		
0	0	10,43	5,95	1,54	0,79
0	0,6	10,31	6,65	1,59	0,82
0,2	0,6	8,15	4,71	1,38	0,66
0,5	0,6	8,11	4,17	1,25	0,62
1	0,6	8,35	4,32	1,31	0,62
0,5	0,4	8,05	4,01	1,24	0,61
0,2	0,4	8,95	5,05	1,35	0,65

Морозостійкість. Морозостійкість бетону в не меншій мірі ніж міцність визначається характером його порової структури. Капілярні макропори є основним дефектом будови щільно укладеного бетону, що знижує його морозостійкість. За даними Г.І.Горчакова [76] морозостійким виявляється бетон з вмістом капілярних пор не більше 5...7%. Ним запропоновано емпіричне рівняння, що зв'язує морозостійкість F з капілярною пористістю Π_k степеневою залежністю:

$$F = (14 - \Pi_k)^{2,7} . \quad (3.15)$$

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

Крім об'єму і розміру пор, найважливішим параметром, що визначає морозостійкість бетону, є співвідношення об'ємів умовно-замкнених пор, утворених в результаті контракції і повітровтягування, і відкритих пор, що насичуються



замерзаючою водою. Це співвідношення в тій чи іншій формі може служити критерієм морозостійкості бетону [82].

Відповідно до відомих рекомендацій в бетони з морозостійкістю понад F50 введення зольного наповнювача допускається лише після проведення спеціальних досліджень. В роботі [77] встановлено, що при дозуванні золи 30...40% маси змішаного в'язучого спостерігається різке збільшення капілярного підсосу і водопоглинання, особливо в початковій строки випробувань. Вимірювання показали також, що при заміні цементу золю істотно зменшується обсяг контракційних пор і, відповідно, зростає співвідношення між капілярною і контракційною пористістю.

Наші експериментальні дані (табл. 3.8) також показують, що наповнювач, що включає лише золу-виносу, збільшує відкриту пористість бетону при постійній витраті в'язучого. При цьому інтегральна пористість бетону залишається практично незмінною, що дає підстави припускати про зменшення співвідношення об'ємів закритих і відкритих пор.

Включення МК до складу наповнювача сприяє зменшенню об'єму відкритих макропор, що насичуються водою. При однаковому водовмісті бетонних сумішей зменшення об'єму капілярних пор може бути пов'язано зі збільшенням витрати цементу і ступеня його гідратації. У розглянутих складах бетону (табл. 3.7), очевидно, треба враховувати сумарну витрату цементу і ЗМКН, тобто загальну витрату в'язучого, що взаємодіє з водою. Як показано раніше, ЗМКН не тільки збільшує вміст в'язучого в бетоні, а й забезпечує його більш високу ступінь гідратації. Для бетонів з ЗМКН характерним є також більш високе співвідношення загального об'єму пор і об'єму відкритих пор (табл. 3.8), що також має сприяти підвищенню морозостійкості.

Кінетику зміни міцності бетону протягом циклічного заморожування і відтавання визначали випробуванням контрольних і основних зразків з визначенням коефіцієнта морозостійкості. Випробування проводили через кожні 25 циклів заморожування і відтавання. Результати випробувань наведені на рис. 3.4.

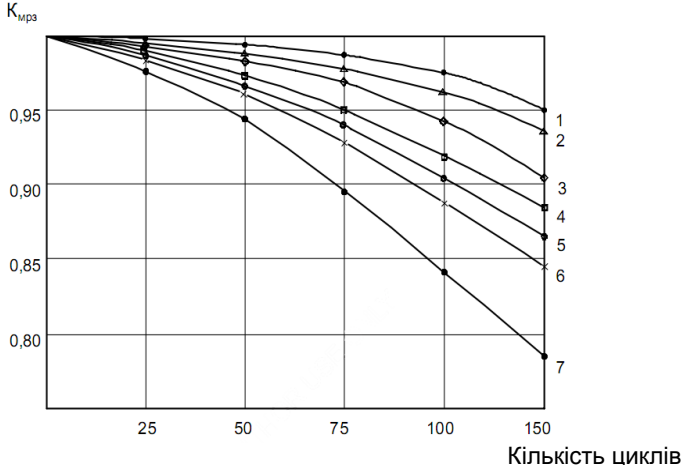


Рис. 3.4. Вплив складу наповнених бетонів на коефіцієнт морозостійкості ($K_{\text{мпз}}$):

- 1 – $X_1 = 0,5$; $X_2 = 0,4$; 2 – $X_1 = 0,2$; $X_2 = 0,4$; 3 – $X_1 = 0$; $X_2 = 0$;
4 – $X_1 = 0,2$; $X_2 = 0,6$; 5 – $X_1 = 0,5$; $X_2 = 0,6$; 6 – $X_1 = 1$; $X_2 = 0,6$;
7 – $X_1 = 0$; $X_2 = 0,6$; ($X_3 = 0,40$; $X_4 = 0,55$; $X_c = 0,01$)

Аналіз отриманих даних показує, що марка за морозостійкістю досліджених бетонів ($K_{\text{МПЗ}} \geq 0,95$) коливається в діапазоні F 50...F150. Найбільш високу морозостійкість мають бетони з помірною витратою цементу ($\text{Ц}=246 \text{ кг/м}^3$), що містять 10...20% МК і 30...40% золи-виносу. Темп падіння міцності таких бетонів протягом заморожування і відтавання виявився нижчим, ніж бетонів без ЗМКН і витратою цементу 403 кг/м^3 .

Для наповнених бетонів зі зниженою витратою цементу ($\text{Ц}=164 \text{ кг/м}^3$) морозостійкість виявилася в межах марок 50...75. Нижчу морозостійкість мають бетони з зольним наповнювачем без МК при співвідношенні цемент : наповнювач, що дорівнює приблизно 1. Однак, близькі до них значення морозостійкості при однаковому ступені наповнення мають і бетони в яких зола-виносу повністю замінена МК, незважаючи на значно більш низьку пористість, а також більш сприятливі показники середнього розміру пор і однорідності пор за розмірами.



Для пояснення зазначеної невідповідності морозостійкості і показника відкритої пористості проведено вимірювання втягнутого повітря в бетонних сумішах, склади яких наведено в табл. 3.7. У всі суміші вводили суперпластифікатор Melflux 2651f в кількості, що відповідає $X_C = 0,01$, тобто 1% від витрати води замішування або 0,6...1,2% від витрати цементу. Об'єм залученого повітря визначали компресійним методом. Результати замірів повітровтягнення наведені нижче:

№ складу за табл. 3.7	1	2	3	4	5	6	7
Об'єм втягнутого повітря, %	1,9	1,5	1,7	1,5	0,5	1,8	2,0

З них випливає, що в ненаповнених бетонних сумішах, що містять 0,6% суперпластифікатора, повітровтягнення досягло 1,9%. Найменша кількість залученого повітря виявилася в бетонній суміші, що містила в якості наповнювача лише МК при співвідношенні цемент: МК=1:1 (склад 5). Знижене повітровтягнення в сумішах з високим вмістом такого дисперсного матеріалу, як метакаолін, узгоджується з відомими теоретичними уявленнями [89]. Відповідно до них на змочування високодисперсних матеріалів потрібна значна кількість води, яка внаслідок цього вже не може виконувати повітровтягуючі і повітроутримуючі функції. Крім того, на високодисперсних матеріалах сорбується більше молекул повітровтягуючих добавок, і це теж позначається на утриманні повітря в суміші. Щоб компенсувати сильне зниження вмісту повітря рекомендується вводити в бетонну суміш додаткову кількість повітровтягуючих добавок.



РОЗДІЛ IV САМОУЩІЛЬНЮВАНІ БЕТОНИ З ДОБАВКАМИ ПОЛІМЕРІВ

4.1. Модифікування цементних бетонів полімерними добавками

Цементний, в тому числі цементно-золинний самоущільнюваний бетон, має ряд суттєвих недоліків, навіть при використанні добавок суперпластифікаторів. Це, в першу чергу, високе співвідношення міцності на стиск (R_{ct}) до міцності на розтяг (R_p), яке збільшується з віком і класом бетону.

Застосування дрібнозернистих золомісних бетонів, хоча й позитивно впливає на співвідношення R_{ct}/R_p , однак воно лишається достатньо високим досягаючи 8...10 і більше. Низька деформативність бетону, і особливо його міцність при розтягу – є однією із головних причин його недостатньої тріщиностійкості. Підвищення міцності цементних бетонів і розчинів на розтяг і їх деформативності – один із головних наслідків застосування полімерних добавок в цементних системах [79; 139; 142; 143; 163].

Дослідження показали [139], що при 10% добавці полівінілацетатної дисперсії (ПВАД) міцність цементно-піщаного розчину (1:3) на згин при комбінованих умовах твердіння (7 діб у воді, остання година на повітрі) перевищила в 3...4 рази міцність контрольних зразків, а при твердінні на повітрі – в 2,9 раз. За даними інших авторів [19; 94], підвищення міцності розчину на згин при введенні 10...20% ПВА хоча і є дещо меншим, однак все рівно лишається значним. Про вплив ПВА на міцність при стиску існують суперечні дані [37; 139] в багатьох випадках відмічається неперервне її зниження зі збільшенням вмісту полімеру. Позитивний вплив на міцність при розтягу та згині і на відношення R_{ct}/R_p відмічається [37; 139; 147] також при введенні в цементні розчини добавок латексу та водорозчинних смол.

Для цементних бетонів і розчинів як матеріалів для підлог суттєвим наслідком введення полімерних добавок є збільшення



їх ударної міцності, адгезійної здатності, зносостійкості [89]. За даними М. Брокарда [9] полівінілацетатний бетон, який зберігався в умовах 50%-ої вологості при полімер-цементному відношенні (П/Ц) 0.05 має в 3 рази більшу стійкість до стирання, ніж звичайний бетон. При П/Ц=0.1 і П/Ц=0.2 цей показник відповідно зростає в 12 і 20 разів. В сухих умовах твердіння з підвищеним П/Ц багаторазово зростають також міцність склеювання і ударна міцність зразків.

Позитивний вплив полімерних добавок на порову систему цементного каменя обумовлює їх понижену проникність. При цьому закономірно, що бетон з добавкою ПВА проявляє меншу проникність і більшу стійкість при насиченні неполярними рідинами, а з добавками каучуків і інших неполярних полімерів, водою і іншими полярними рідинами. Цей висновок справедливий і у відношенні стійкості модифікованих бетонів і розчинів по відношенню до агресивної дії різних хімічних речовин [131; 146; 165].

Зниження пористості і наповнення пор полімерами, а також втягнутим повітрям призводить, як відмічає більшість дослідників [89; 62], до підвищення морозостійкості бетонів та розчинів. У роботі Намікі і Охама [32] наведені результати дослідження стійкості зразків модифікованих розчинів, вкладених на звичайний цементний розчин після 10-річної дії зовнішнього середовища в умовах Токію. На відміну від зразків, зв'язаних з немодифікованим розчином і зруйнованих через рік після перебування у звичайних умовах, більшість зразків зв'язаних модифікованим розчином через 10 років мали задовільний стан в тих же умовах. Охама відмічає також [37], що більшість модифікованих розчинів має хорошу стійкість до карбонізації атмосферним CO_2 , що сприяє запобіганню корозії сталевій арматури.

Модифікуючи властивості затверділих бетонів і розчинів, добавки полімерів суттєво відбиваються на реологічних та технологічних властивостях цементних реологічних сумішей.

При низьких полімер-цементних відношеннях вододисперговані і водорозчинні полімери, як правило, мають пластифікуючу та повітровтягуючу дію [89]. З підвищенням



вмісту полімерів, і зокрема ПВА, легкоукладальність сумішей погіршується внаслідок підвищення в'язкості системи [136; 143]. Модифіковані цементні суміші вигідно відрізняються від звичайних підвищеною водоутримуючою здатністю, яка збільшується зі зростанням полімерцементного відношення [143]. Це дозволяє значно покращити оброблюваність, запобігати «висиханню», досягати доброго зчеплення з пористими основами.

Вже порівняно невеликі кількості полімерів (2-3%) дозволяють зменшити кількість мікродефектів в структурі цементного каменя і бетону, підвищити однорідність бетону і модифікувати структуру цементного каменя. Присутність полімерів сприяє прискоренню кристалізації продуктів твердіння цементу, утворенню міцних міжмолекулярних зв'язків між ланками ланцюга полімерів і структурою гідратів [139].

4.2. Властивості самоущільнюваних дрібнозернистих бетонних сумішей із добавками полімерів

Аналіз наявної інформації щодо самоущільнюваних дрібнозернистих золемісних бетонів дозволяє припустити, що одним із ефективних шляхів покращення його технічних властивостей є модифікування добавками суперпластифікаторів (СП) і полімерів. Добавки СП дозволяють забезпечити литу консистенцію бетонної суміші при потрібних Ц/В, вони повинні сприяти підвищенню міцності бетону, зменшенню його пористості і відповідно підвищенню водонепроникності, хімічній стійкості і т.п. При цьому, однак, лишається необхідність корегування ряду важливих властивостей для бетону - міцності при розтягу, деформативності, стираності, ударної міцності, усадки. З цією метою виявляється перспективним введення в бетонну суміш комплексних поліфункціональних модифікаторів (ПФМ), які містять разом з СП полімерну добавку, що використовується для отримання цементно-полімерних бетонів.

Використовували два види полімерних добавок.



1. Полівінілацетатна дисперсія (ПВАД) є характерною водною емульсією термопластичного полярного полімеру ПВА з наявністю в молекулярному ланцюзі групи $[-CH_2-CH-]_n$.

2. Полівінілацетатвінілверсатат (ПВАВ) – водорозчинний сополімер ПВА [16].

Композиція СП – ПВАД (ПФМ₁) у бетонну суміш може бути введена з водою затворення, а СП – ПВАВ (ПФМ₂) – як із водою затворення, так і в сухому вигляді.

В якості суперпластифікатора використовували добавку полікарбоксилатного типу Melflux 2651f.

Технологічна ефективність самоущільнюваних бетонних сумішей визначається їхньою водопотребою і стійкістю до розшарування. Важливе значення має також період «життєздатності» сумішей, тобто зберігання їх літої консистенції в часі, їхня спроможність до повітрявтязування в процесі перемішування і повітряутримання в процесі транспортування й ущільнення.

На рис. 4.1 приведені експериментальні дані щодо водопотреби дрібнозернистих бетонів різних складів без добавок ПФМ із використанням вихідних матеріалів, характеристика яких приведена вище. Витрату води доводили до розпливу дрібнозернистої бетонної суміші 550...600 мм (клас SF1 за EN 12350-8). При такому розпливі, як показали попередні дослідження, осадка стандартного конуса склала 25...26 см. З рис. 4.1 очевидно, що в міру зростання масового співвідношення піску і цементу (n), нормальної густоти цементу і водопотреби піску росте водопотреба сумішей, що узгоджується з відомими уявленнями [64].

Водовідділення бетонних сумішей визначали після їх відстоювання в циліндричній посуді за методикою ДСТУ Б В.2.7-114.

Із збільшенням кількості піщаного наповнювача і його крупності водовідділення збільшується (рис. 4.2). Збільшення нормальної густоти цементу призводить до зменшення водовідділення, що узгоджується з теоретичними уявленнями, розвинутими І.М. Ахвердовим і І.М. Грушко про водоутримуючу спроможність цементу як функцію його



нормальної густоти [60; 78]. Так, по І.М. Ахвердову [60], максимальне значення V/C , що характеризує водоутримуючу здатність цементного тіста у його статичному стані дорівнює $1,65K_{н.г.}$ (де $K_{н.г.}$ – нормальна густина цементу в частках одиниці).

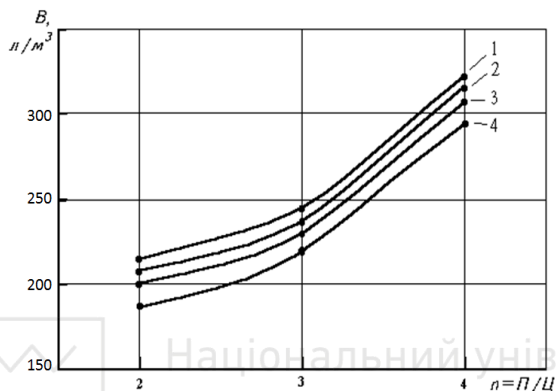


Рис. 4.1. Вплив пісчано-цементного відношення (n) самоущільнюваної дрібнозернистої бетонної суміші на її водопотребу: 1 – портландцемент ПЦ₃, пісок П₁, 2 – ПЦ₂, П₁; 3 – ПЦ₁, П₁; 4 – ПЦ₁, П₂

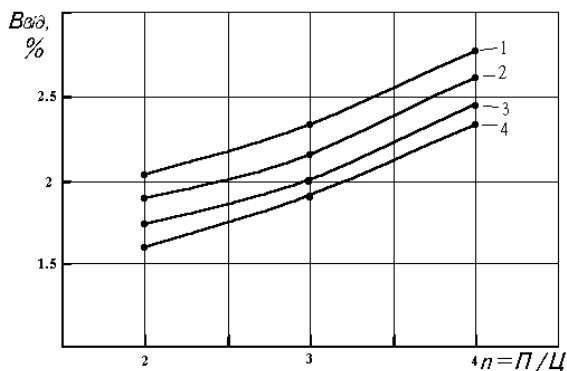


Рис. 4.2. Вплив складу самоущільнюваної дрібнозернистої бетонної суміші на водовідділення: 1 – портландцемент ПЦ₃, пісок П₁; 2 – ПЦ₂, П₁; 3 – ПЦ₁, П₁; 4 – ПЦ₁, П₂₂



Повітрявміст самоущільнюваних сумішей визначали об'ємним способом [136]. У самоущільнюваних дрібнозернистих бетонних сумішах без ПФМ він коливається в межах 10-25 л/м³, і зростає із збільшенням вмісту піску і зменшенням його крупності (рис. 4.3). Незначні коливання повітрявмісту викликає зміна виду цементу, що, очевидно, пов'язано з вмістом і видом мінеральної добавки.

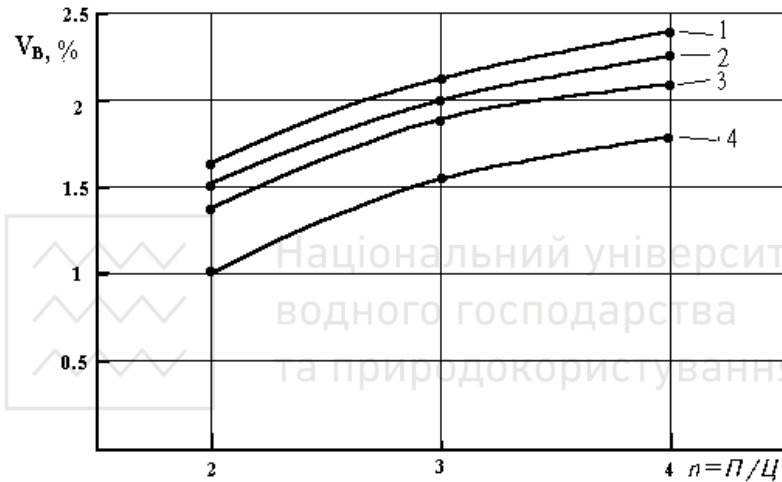


Рис. 4.3. Вплив складу самоущільнюваної дрібнозернистої бетонної суміші на повітрявміст:

1 – портландцемент ПЦ₃, пісок П₁; 2 – ПЦ₂, П₁; 3 – ПЦ₁, П₁;
4 – ПЦ₁, П₂

Для вивчення впливу вмісту і складу ПФМ на зазначені вище властивості самоущільнюваних бетонних сумішей, були виконані алгоритмізовані експерименти з використанням ПФМ₁ і ПФМ₂ відповідно до трьохрівневого трьохфакторного плану В₃ [137]. Умови планування і результати експериментів приведені в табл. 4.1, 4.2.



Таблиця 4.1

Умови планування експериментів

№ з/п	Фактори	Кодоване позначення	Рівні варіювання		
			-1	0	+1
1	Вміст ПФМ, % маси цементу	X ₁	0,5	1,75	3
2	Масова частка (СП) у складі ПФМ	X ₂	0	0,5	1,0
3	Масове співвідношення піску і цементу	X ₃	2	3	4

Таблиця 4.2

Матриця планування і результати експериментів

№ з/п	Кодовані значення факторів			Водопотреба, л/м ³		Водовідділення, % об'єму бетонної суміші	Повітрявтягування, %
	X ₁	X ₂	X ₃				
1	+1	+1	+1	194	192	2.4/2.5	1.5/1.7
2	+1	+1	-1	164	162	1.6/1.3	0.65/0.8
3	+1	-1	+1	269	265	0.9/0.9	3.25/3.4
4	+1	-1	-1	195	191	0.3/0.2	2.35/2.5
5	-1	+1	+1	192	188	1.7/1.6	1.9/1.7
6	-1	+1	-1	269	266	1.1/1.0	1.8/2.1
7	-1	-1	+1	299	299	1.4/1.3	2.6/2.7
8	-1	-1	-1	208	205	0.7/0.5	1.8/2.1
9	+1	0	0	191	188	1.2/1.1	2.3/2.5
10	-1	0	0	223	220	1.1/0.9	2.0/2.1
11	0	+1	0	188	184	1.7/1.5	1.6/1.8
12	0	-1	0	226	222	0.8/0.6	2.2/2.4
13	0	0	+1	181	180	1.6/1.7	2.7/2.7
14	0	0	-1	241	238	0.7/0.5	1.8/1.9
15	0	0	0	201	198	1.2/1.0	2.3/2.3
16	0	0	0	199	201	1.3/1.1	2.1/2.6
17	0	0	0	203	197	1.3/1.1	2.2/2.4

Примітки: 1. У дослідях використовували поргладцемент ПЦІ і пісок ПІ. 2. У чисельнику приведені результати експериментів із використанням ПФМ1, у знаменнику – ПФМ2.



Статистичне опрацювання експериментальних даних дозволило одержати відповідні рівняння регресії, приведені в табл. 4.3 у кодованих змінних.

Таблиця 4.3

Рівняння регресії для властивостей самоущільнюваних дрібнозернистих бетонних сумішей

№ з/п	Властивість	Рівняння
Поліфункціональний модифікатор ПФМ ₁		
1	Водопотреба, л/м ³	$y_3=201.4-17.9X_1-8.9X_2+33.2X_3+6.0X_1^2+6.0X_2^2+10.3X_3^2-7.6X_1X_2-8.0X_1X_3-7.4X_2X_3$ (4.1)
2	Водовідділення, %	$y_4=1.214+0.04X_1+0.44X_2+0.36X_3-0.021X_1^2+0.079X_2^2-0.021X_3^2+0.236X_1X_2$ (4.2)
3	Повітрявтягування, %	$y_5=2.187-0.475X_2+0.355X_3-0.020X_1^2-0.270X_2^2+0.08X_3^2-0.344X_1X_2+0.106X_1X_3-0.094X_2X_3$ (4.3)
Поліфункціональний модифікатор ПФМ ₂		
4	Водопотреба, л/м ³	$y_5=198.6-17.9X_1-19.1X_2+33.3X_3+5.9X_1^2+5.1X_2^2+11.5X_3^2-6.4X_1X_2-8.5X_1X_3-7.5X_2X_3$ (4.4)
5	Водовідділення, %	$y_6=1.036+0.07X_1+0.44X_2+0.45X_3-0.01X_1^2+0.04X_2^2-0.09X_3^2+0.237X_1X_2$ (4.5)
6	Повітрявтягування, %	$y_7=2.41-0.500X_2+0.28X_3-0.034X_1^2-0.234X_2^2+0.034X_3^2-0.3X_1X_2+0.2X_1X_3-0.125X_2X_3$ (4.6)

При аналізі отриманих рівнянь привертає увагу високий рівень збіжності рівнянь показників властивостей бетонних сумішей із двома типами ПФМ. Розбіжність розрахункових значень водопотреби бетонних сумішей для двох ПФМ при вимірі чинників в обраній області варіювання складає не більш 5%, водовідділення – 20%, повітрявтягування – 10%. Як і слід було очікувати найбільш істотне зниження водопотреби має



місце при переважанні в складі ПФМ суперпластифікатора Melflux 2651f (рис. 4.3). При цьому найбільш істотний вплив СП позначається вже при дозуванні 0.5% маси цементу (зменшення водопотреби біля 15% (рис. 4.1, 4.4)). Загальне зменшення водопотреби при вмісті СП 3% склало 28.5%.

Полівінілацетатна дисперсія (ПВАД) і водний розчин полівінілацетатвінілверсатата (ПВАВ) можна віднести в досліджуваній області полімерцементних відношень до порівняно слабких пластифікаторів. При дозуванні 0.5% вони викликають практично невідчутне зниження водопотреби, при 3% воно склало біля 7%. За даними Ю.С. Черкінського [165] ПВАД пластифікує розчини при її введенні до 8%. Проте при подальшому збільшенні її вмісту до 20% водопотреба може знову зростати і відповідно падає рухливість. Аналогічний висновок підтверджується даними Охама [37]. Водопотреба бетонних сумішей із ПФМ₁, що містять обидва компоненти, має проміжне значення, хоча при їх однаковому введенні за масою вона виявляється більш низькою чим це впливає з умов адитивності (рис. 4.4).

Про вплив суперпластифікаторів на водовідділення бетонних сумішей, у т.ч. і дрібнозернистих, є суперечливі дані. Так, за даними В.Г. Батракова [69] бетонні суміші із СП у порівнянні з рівнорухливими непластифікованими сумішами характеризуються більшою звязністю і меншим водовідділенням. Тим не менше відзначається схильність таких сумішей до розшарування. У відповідності з нашими експериментальними даними при дозуванні СП до 1% водовідділення самоущільнюваних сумішей практично не збільшується, а потім має тенденцію до росту (рис. 4.5). У той же час як ПВАД так і ПВАВ забезпечують зниження водовідділення у всьому інтервалі дозувань від 0.5 до 3%. Наявність у ПФМ обох компонентів призводить до того, що їх водовідділення забезпечується таким як і без добавок (рис. 4.5). Це можна пояснити, головним чином, повітревтягуючою здатністю досліджуваних полімерних добавок. Із збільшенням вмісту ПВАД від 0 до 3% у самоущільнювані суміші втягується додатково більше 1% повітря і сумарний повітрявміст в них зростає до 3% (рис. 4.6).

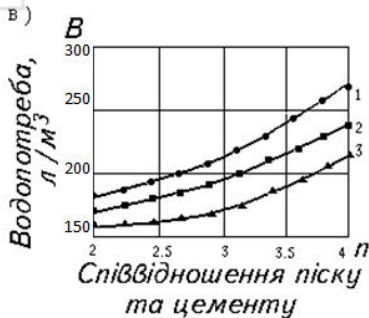
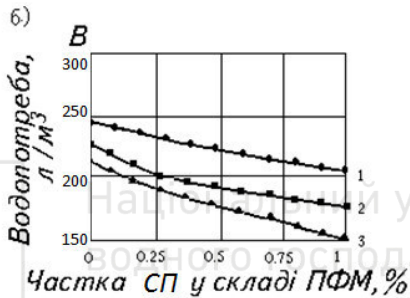
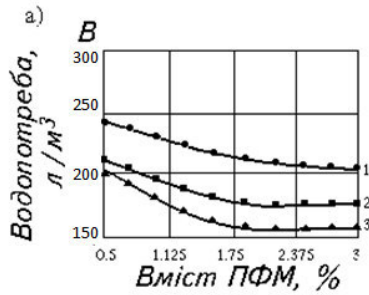


Рис. 4.4. Розрахункові залежності водопотреби самоущільнюваних бетонів із добавками ПФМ:
а) частка СП у складі ПФМ: 1 – 0; 2 – 0.5; 3 – 1; ($X_3=0$);
б) вміст ПФМ, %: 1 – 0.5; 2 – 1.75; 3 – 3; ($X_3=0$);
в) вміст ПФМ, %: 1 – 0.5; 2 – 1.75; 3 – 3; ($X_2=0$)

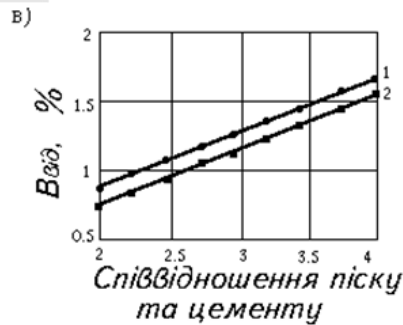
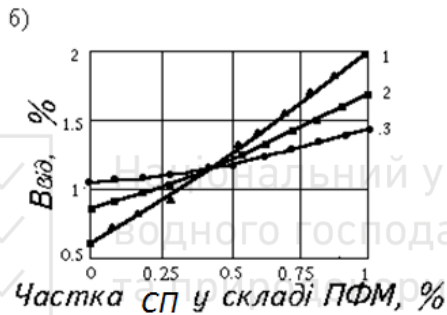
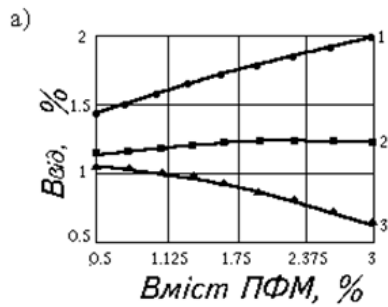
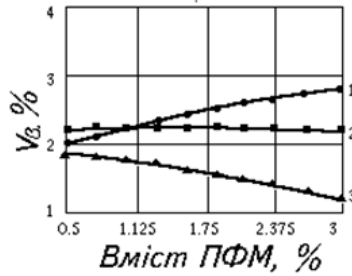


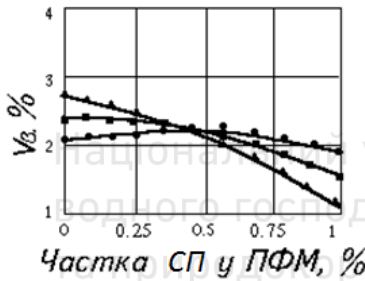
Рис. 4.5. Розрахункові залежності водовідділення (%) самоущільнюваних бетонів із добавками ПФМ₁:
а) частка СП у складі ПФМ: 1 – 0; 2 – 0.5; 3 – 1; ($X_3=0$);
б) вміст ПФМ, %: 1 – 0.5; 2 – 1.79; 3 – 3; ($X_2=0$);
в) вміст ПФМ, %: 1 – 0.5; 2 – 1.75; ($X_2=0$)



а)



б)



в)

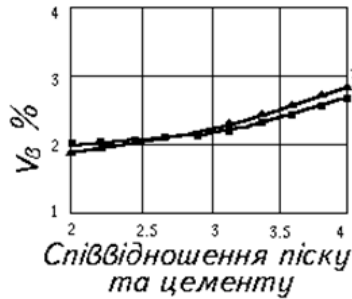


Рис. 4.6. Розрахункові залежності повітрявтягування самоущільнюваних бетонів із добавками ПФМ:
а) частка СП у складі ПФМ: 1 – 0; 2 – 0.5; 3 – 1; ($X_3=0$);
б) вміст ПФМ, %: 1 – 0.5; 2 – 1.79; 3 – 3; ($X_3=0$);
в) вміст ПФМ, %: 1 – 0.5; 2 – 1.75; ($X_2=0$)



Розрахункові криві повітрявтягування самоущільнюваних бетонних сумішей, отримані на основі відповідних рівнянь регресії, відображають відомий висновок [23], що в рухомих бетонних сумішах суперпластифікатори сприяють видаленню повітря. Спільне введення СП і ПВАД або ПВАВ запобігає виникненню зазначеного вище негативного ефекту.

Для самоущільнюваних бетонних сумішей практичне значення має зберігання рухливості сумішей у часі. Вивчали зміну рухливості сумішей по зануренню конуса Стройцила (ЗК) при $n=3$, В/Ц=0,6 при температурі $20\pm 2^\circ\text{C}$.

Вихідними матеріалами для виготовлення самоущільнюваних сумішей у дослідях служили портландцемент ПЦ₁, пісок П₁ з добавками СП і ПВАД. Результати дослідів приведені на рис. 4.7.

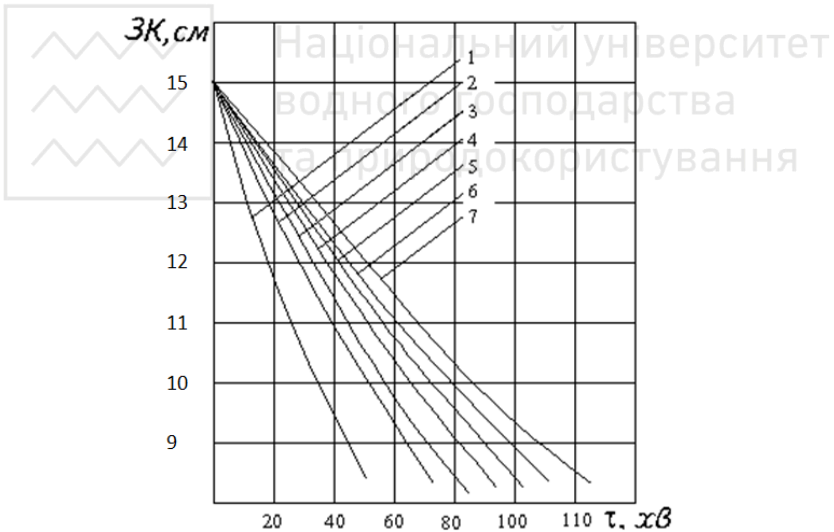


Рис. 4.7. Вплив добавок ПФМ на втрату рухливості самоущільнюваних бетонних сумішей:

- 1 – СП - 0.5% маси цементу; 2 – СП - 3%; 3 – СП - 0.25%;
ПВАД - 0.25%; 4 – без добавок; 5 – СП - 1.5%; ПВАД - 1.5%;
6 – ПВАД - 0.5%; 7 – ПВАД - 3%



Найбільш низький темп падіння рухливості мають суміші, у яких ПФМ представлений лише ПВАД, а найбільш високий – СП. Збільшення дози добавки сприяє деякій стабілізації рухливості. Подовжений період «життєздатності» самоущільнюваних сумішей із добавкою ПВАД можна пояснити сповільнюючим впливом останньої на строки тужавлення цементного тіста і менш інтенсивною кінетикою росту пластичної міцності.

4.3. Вплив складу поліфункціонального модифікатора на основні властивості СУБ

З використанням поліфункціональних модифікаторів обох типів ПФМ₁ (ПВАД+СП) і ПФМ₂ (ПВАВ+СП) були реалізовані експерименти відповідно до матриці трьохрівневого плану [137] і отриманий комплекс рівнянь регресії міцності на стиск (R_{ct}) і згин ($R_{зг}$), а також стираності (St) і водопоглинання (W) дрібнозернистого самоущільнюваного бетону в 28-ми добовому віці. Отримано також рівняння масових співвідношень піску і цементу (n), що забезпечують при заданих значеннях варійованих факторів необхідні значення розпливу конуса ($R_k = 270...280$ мм).

У якості вихідних матеріалів були прийняті портландцемент (ПЦ₁) М500 і середньозернистий кварцовий пісок (П₁). В якості суперпластифікатора використовували добавку полікарбоксилатного типу Melflux 2651f (СП).

Досліди проводили в два етапи. На першому етапі при варіюванні вмісту ПФМ (X_1), масової частки СП у ПФМ (X_2) і водоцементного відношення (X_3) знаходили необхідне значення n із побудованого відповідного рівняння регресії, на другому – при тих же варійованих факторах із розрахунково визначеним n виготовляли зразки - призми $4 \times 4 \times 16$ см для дослідження R_{ct} , $R_{зг}$ і W , а також зразки-куби з розміром 7.07 см для визначення стиранності бетону.

Зразки тверділи до дослідів у повітряно-вологих умовах при $20 \pm 2^\circ$ С. Розрахунковий склад СУБ у кожній точці матриці визначали за допомогою методики [64]. Міцнісні



характеристики зразків бетону визначали за ДСТУ Б В.2.7-224:2009, водопоглинання – за ДСТУ Б В.2.7-170:2008, стираність – за ДСТУ Б В.2.7-212:2009.

Досліди по визначенню міцності проводили на зразках у віці 7, 28 і 90 діб. Умови планування і результати дослідів приведені в табл. 4.4-4.7.

Таблиця 4.4

Умови планування експериментів

Фактори	Кодовані значення	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Вміст ПФМ, % маси цементу	X ₁	0,5	1,75	3	1,25
Масова частка в ПФМ суперпластифікатора Melflux 2651f	X ₂	0	0,5	1,0	0,5
Водо-цементне відношення	X ₃	0,3	0,45	0,6	0,15

Таблиця 4.5

Міцнісні показники СУБ із добавками ПФМ

Точки плану	Матриця планування			Міцність на стиск, МПа у віці, діб			Міцність на згин, МПа у віці, діб		
	X ₁	X ₂	X ₃	7	28	90	7	28	90
1	+1	+1	+1	22.1/ 21.5	33.5/ 34.6	38.5/ 38.1	3.8/4.1	5.1/5.3	5.4/5.5
2	+1	+1	-1	45.6/ 43.4	59.2/ 58.1	63.9/ 64.5	5.2/5.5	6.5/6.8	6.9/6.9
3	+1	-1	+1	12.3/ 14.1	20.1/ 22.5	23.5/ 25.5	3.5/4.1	4.1/4.5	4.9/5.0
4	+1	-1	-1	32.1/ 35.2	41.2/ 43.1	46.1/ 46.5	4.8/4.8	5.9/6.1	7.1/7.1
5	-1	+1	+1	16.5/ 15.5	25.4/ 25.1	29.7/ 28.5	2.9/3.0	3.7/3.9	3.9/4.0



продовження табл. 4.5

6	-1	+1	-1	35.4/ 33.5	47.8/ 47.5	52.6/ 52.1	3.6/3.6	5.1/5.5	5.5/5.8
7	-1	-1	+1	15.1/ 17.2	24.3/ 26.5	26.5/ 27.1	3.5/3.4	4.4 /4.7	4.9 /5.2
8	-1	-1	-1	36.8/ 37.9	49.1/ 51.5	52.3/ 52.5	4.7/4.5	5.7/5.9	6.9/6.9
9	+1	0	0	26.6/ 27.8	37.5/ 38.3	41.2/ 42.4	5.6/5.3	6.2/6.5	6.8/6.9
10	-1	0	0	23.9/ 24.2	34.6/ 34.2	38.2/ 37.5	4.4/4.5	5.8/6.1	6.7/6.8
11	0	+1	0	27.7/ 28.4	38.5/ 39.2	41.4/ 41.1	3.1/3.5	4.2/4.5	4.5/4.8
12	0	-1	0	24.3/ 24.2	33.7/ 34.5	34.9/ 35.5	5.9/6.1	6.3/6.5	6.8/6.8
13	0	0	+1	17.5/ 17.5	28.2/ 30.5	30.1/ 30.8	3.9/3.9	4.9/5.2	5.5/5.6
14	0	0	-1	39.7/ 40.4	52.3/ 53.5	54.5/ 54.7	5.5/5.3	6.3/6.5	7.2/7.1
15	0	0	0	23.5/ 24.5	36.2/ 37.5	39.4/3 9.5	4.6	6.1	6.5
16	0	0	0	25.1/ 24.5	35.3/ 36.4	38.1/ 39.1	4.8/4.4	5.9/5.8	6.1/6.2
17	0	0	0	26.3/ 28.4	37.1/ 38.1	37.5/ 38.5	4.8/4.5	6.2/6.3	6.7/6.6

Примітка. У чисельнику приведені значення властивостей СУБ із ПФМ₁, у знаменнику – ПФМ₂

Таблиця 4.6

Водопоглинання і стираність СУБ із добавкою ПФМ

Точки плану	Матриця планування			Водопоглинання, % у віці 28 діб	Стираність, г/см ² у віці 28 діб
	X ₁	X ₂	X ₃		
1	+1	+1	+1	9.5/10.1	1.1/1.3
2	+1	+1	-1	3.4/3.2	0.63/0.61
3	+1	-1	+1	11.6/10.7	0.58/0.59
4	+1	-1	-1	6.2/5.8	0.41/0.43



продовження табл. 4.6

5	-1	+1	+1	10.7/10.5	1.2/1.3
6	-1	+1	-1	5.2/5.5	0.81/0.84
7	-1	-1	+1	11.1/10.4	1.0/1.1
8	-1	-1	-1	5.5/4.7	0.72/0.69
9	+1	0	0	7.5/7.7	0.63/0.65
10	-1	0	0	8.1/8.5	0.82/0.81
11	0	+1	0	7.3/7.7	0.71/0.73
12	0	-1	0	8.2/6.8	0.66/0.65
13	0	0	+1	10.5/11.1	0.89/0.86
14	0	0	-1	4.7/4.5	0.51/0.50
15	0	0	0	7.6/7.8	0.62/0.65
16	0	0	0	7.7/7.5	0.63/0.62
17	0	0	0	7.5/7.0	0.65/0.63

Примітка. У чисельнику приведені значення властивостей СУБ із ПФМ₁, у знаменнику – ПФМ₂.

Таблиця 4.7

Співвідношення піску і цементу в СУБ із добавками ПФМ

Точки плану	Матриця планування			n	Точки плану	Матриця планування			n
	X ₁	X ₂	X ₃			X ₁	X ₂	X ₃	
1	+1	+1	+1	5.1/5.0	10	-1	0	0	2.5/2.7
2	+1	+1	-1	1.2/1.1	11	0	+1	0	3.5/3.2
3	+1	-1	+1	4.5/4.3	12	0	-1	0	2.2/2.4
4	+1	-1	-1	0.8/0.9	13	0	0	+1	4.3/4.5
5	-1	+1	+1	4.8/5.1	14	0	0	-1	1/1.1
6	-1	+1	-1	1/1.3	15	0	0	0	3.1/3.3
7	-1	-1	+1	4.1/4.2	16	0	0	0	2.9/2.7
8	-1	-1	-1	0.6/0.8	17	0	0	0	3.2/3.0
9	+1	0	0	3.0/3.1					

Примітка. У чисельнику приведені значення властивостей СУБ із ПФМ₁, у знаменнику – ПФМ₂.

Додатково були проведені дослідження по визначенню міцнісних властивостей СУБ без добавок (рис. 4.8).

У результаті статистичного опрацювання отримані



рівняння регресії (математичні моделі) показників властивостей СУБ у 28-добовому віці адекватні при 95%-й довірчій ймовірності, приведені в кодованих змінних у табл. 4.8.

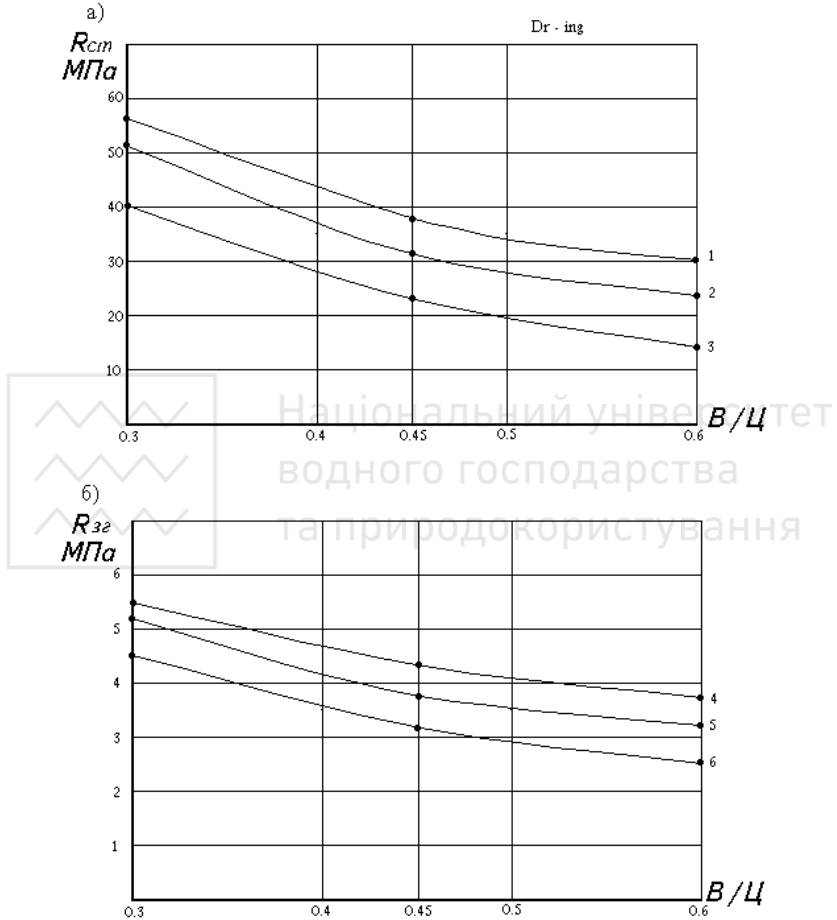


Рис. 4.8. Міцність на стиск (а) і згин (б) СУБ без добавок ПФМ:
1 – R_{ст} у 90 діб; 2 – 28 діб; 3 – 7 діб; 4 – R_{зг} у 90 діб;
5 – 28 діб; 6 – 7 діб



Таблиця 4.8

Рівняння регресії властивостей СУБ з ПФМ

№ з/п	Вихідний параметр	Рівняння регресії
Поліфункціональний модифікатор ПФМ ₁		
1	Границя міцності при стиску ($R_{ст}$), МПа	$y_9=36.836+1.03X_1+3.6X_2-11.81X_3-1.136X_1^2-1.086X_2^2+3.064X_3^2+3.95X_1X_2$ (4.7)
2	Границя міцності при згині ($R_{зг}$), МПа	$y_{10}=6.002+0.31X_1-0.18X_2-0.73X_3+0.066X_1^2-0.684X_2^2-0.344X_3^2+0.362X_1X_2$ (4.8)
3	Водопоглинання (W), %	$y_{11}=7.63-0.24X_1-65X_2+2.84X_3+0.174X_1^2+0.124X_2^2-0.026X_3^2-0.525X_1X_2$ (4.9)
4	Стиранність ($Ст$), г/см ²	$y_{12}=0.643-0.12X_1+0.108X_2+0.169X_3+0.076X_1^2+0.036X_2^2+0.051X_3^2+0.056X_1X_2+0.051X_2X_3$ (4.10)
5	Масове співвідношення піску і цементу (n)	$y_{13}=2.928+0.16X_1+0.34X_2+1.82X_3-0.064X_1^2+0.036X_2^2-0.036X_3^2-0.164X_2X_3$ (4.11)
Поліфункціональний модифікатор ПФМ ₂		
6	Границя міцності при стиску ($R_{ст}$), МПа	$y_{14}=37.836+1.18X_1+2.64X_2-11.45X_3-1.832X_1^2-1.232X_2^2+3.918X_3^2+4.063X_1X_2$ (4.12)
7	Границя міцності при згині ($R_{зг}$), МПа	$y_{15}=6.12+0.31X_1-0.17X_2-0.72X_3+0.158X_1^2-0.642X_2^2-0.292X_3^2+0.338X_1X_2$ (4.13)
8	Водопоглинання (W), %	$y_{16}=7.60-0.21X_1-0.14X_2+2.91X_3+0.396X_1^2-0.454X_2^2+0.096X_3^2-0.513X_1X_2$ (4.14)
9	Стиранність ($Ст$), г/см ²	$y_{17}=0.63-0.116X_1+0.132X_2+0.208X_3+0.106X_1^2+0.066X_2^2+0.056X_3^2+0.067X_1X_2+0.072X_2X_3$ (4.15)
10	Масове співвідношення піску і цементу (n)	$y_{18}=2.931+0.31X_2+1.79X_3+0.031X_1^2-0.069X_2^2-0.069X_3^2+0.112X_2X_3$ (4.16)



Аналіз структури рівнянь і величин коефіцієнтів регресії показує достатньо близький вплив ПФМ1 і ПФМ2 на основні властивості СУБ.

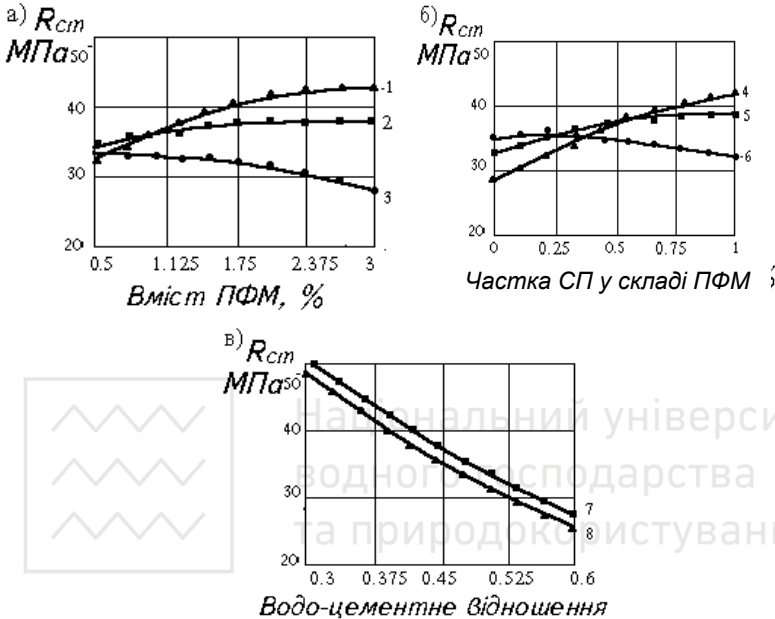


Рис. 4.9. Вплив факторів складу на міцність при стиску цементного ДЗБ із добавкою ПФМ₁:

- 1 – В/Ц=0.45 ($X_3=0$); 2 – В/Ц=0.6 ($X_3=1$); 3 – В/Ц=0.3 ($X_3=-1$);
4 – В/Ц=0.6 ($X_3=1$); 5 – В/Ц=0.45 ($X_3=0$); 6 – В/Ц=0.3 ($X_3=1$);
Частка СП у складі ПФМ: 7 – 1 ($X_2=+1$); 8 – 0.5 ($X_2=0$).

Технологічний аналіз рівнянь дозволяє проранжувати чинники по їхньому впливу на вихідні параметри, кількісно оцінити як індивідуальний, так і спільний їх вплив. Для міцності СУБ при стиску і згині (рис. 4.9, 4.10), як і слід було очікувати, із досліджуваних чинників найбільш значним виявилось водоцементне відношення (X_3). При цьому характерно, що для бетонів із добавками ПФМ, так як і для звичайних цементно-піщаних розчинів [3], збільшення В/Ц веде до значно більш



істотного падіння міцності на стиск ніж міцності на згин. Якщо $R_{ст}$ при зміні В/Ц від 0.3 до 0.6 падає майже в 2 рази, то $R_{зг}$ – в 1.3 рази. При цьому інтенсивність падіння як $R_{ст}$, так і $R_{зг}$ практично не залежить ні від вмісту ПФМ (X_1), ні від співвідношення їхніх компонентів (X_2).

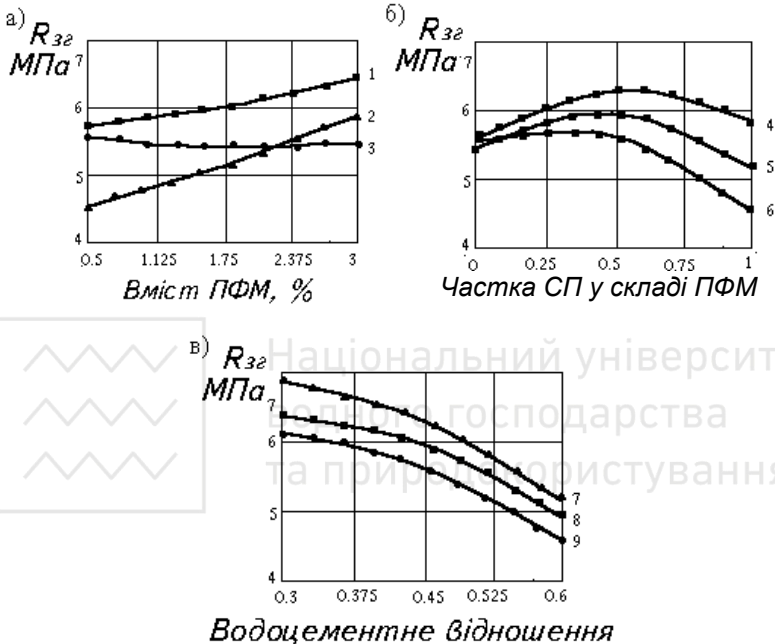


Рис. 4.10. Вплив факторів складу на міцність при стиску СУБ із добавкою ПФМ₂:

- 1 – В/Ц=0.45 ($X_3=0$); 2 – В/Ц=0.6 ($X_3=1$); 3 – В/Ц=0.3 ($X_3=-1$);
4 – В/Ц=0.6 ($X_3=1$); 5 – В/Ц=0.45 ($X_3=0$); 6 – В/Ц=0.3 ($X_3=1$);
Частка СП у складі ПФМ: 7 – 1 ($X_2=+1$); 8 – 0.5 ($X_2=0$)

Збільшення вмісту ПФМ (X_1) при В/Ц=const може сприяти або збільшенню, або зменшенню міцності на стиск СУБ в залежності від складу композиційної добавки. У тому випадку, коли ПФМ представлений тільки суперпластифікатором Melflux збільшення його вмісту при постійному В/Ц призводить до суттєвого підвищення міцності. При В/Ц=0.45 збільшення



вмісту Melflux від 0.5 до 3% призвело до росту міцності на 23...25% (рис. 4.9).

Інший характер впливу на міцність при стиску другого компонента ПФМ - полівінілацетатної добавки. У обраній області варіювання збільшення її вмісту, особливо від 1.5 до 3%, призводить до істотного падіння величини R_{ct} (рис. 4.9). Уповільнення процесу наростання міцності полімерцементів спостерігалось й іншими дослідниками [109], хоча наявні дані дуже суперечливі, що можна пояснити розходженнями у вихідних матеріалах, технології приготування сумішей, умовах їхнього твердіння і т.п. За даними М.М. Круглицького [109], із збільшенням вмісту полівінілацетатної емульсії і полівінілового спирту в цементному камені до 1% міцність його при стиску в умовах твердіння при 18...20° С і відносній вологості 60...65% зменшилася на 13%. Проте в композиціях, що містять 20% ПВАД, зниження R_{ct} склало усього 8.7%.

Наші експериментальні дані і отримані по ним моделі R_{ct} показують, що при малих дозуваннях ПФМ (від 0.5 до 1.75%) зміна в їхньому складі масової частки СП від 0 до 0.5 практично не викликає зниження міцності при стиску СУБ.

Вплив досліджуваних ПФМ на міцність цементних композицій при згині (рис. 4.10) має ряд особливостей. Найбільше інтенсивно $R_{зг}$ у досліджуваній області дозувань ПФМ росте в тих випадках, коли добавка представлена лише суперпластифікатором Melflux. Проте абсолютні значення міцності на згин залишаються більш високими при використанні ПФМ із максимальною масовою часткою СП не більше 0.5 (рис. 4.10). Отримані дані показують, що в області порівняно невисоких досліджуваних концентрацій як ПВАД так і ПВАВ відчувається їх помітний позитивний вплив на $R_{зг}$ цементних композицій. Як відомо [143], цей вплив зростає в області високих концентрацій полімерних добавок. Відповідно знижується і співвідношення $R_{ct}/R_{зг}$. Наприклад, за даними М.М. Круглицького [107] міцність при згині цементного каменю, модифікованого полівінілацетатної емульсією в кількості 20% маси цементу (у перерахунку на суху речовину) склало 14.1 МПа і була майже у 2 рази вищою ніж при 1%



ПВАД. При цьому співвідношення $R_{ст}/R_{зг}$ склало 3.12, у той час як для цементного каменю без добавок воно було 7.3, при вмісті ПВАД 1% – 5.45. За нашими даними для СУБ з В/Ц=0.3...0.6 без добавок (рис. 4.8) $R_{ст}/R_{зг}$ у 7 діб 5...7, у 28 – 6...9 і в 90 діб – 6.8...9.3. Розрахункові співвідношення $R_{ст}/R_{зг}$ для СУБ із добавками ПФМ₁ і ПФМ₂ при різних значеннях досліджуваних чинників, отримані з використанням відповідних рівнянь регресії, приведені в табл. 4.9.

Таблиця 4.9

Розрахункові співвідношення $R_{ст}/R_{зг}$ СУБ із добавками ПФМ

№ з/п	Відношення натуральних значень факторів до кодованих			$R_{ст}/R_{зг}$		
	$\frac{\tilde{X}_1}{X_1}$	$\frac{\tilde{X}_2}{X_2}$	$\frac{\tilde{X}_3}{X_3}$	7 діб	28 діб	90 діб
1	$\frac{3}{+1}$	$\frac{1}{+1}$	$\frac{0.6}{+1}$	5.81/5.24	6.57/6.53	7.13/6.93
2	$\frac{3}{+1}$	$\frac{0}{-1}$	$\frac{0.6}{+1}$	3.51/3.44	4.9/5.7	4.8/5.1
3	$\frac{0.5}{-1}$	$\frac{1}{+1}$	$\frac{0.6}{+1}$	5.69/5.17	6.86/6.44	7.61/7.12
4	$\frac{0.5}{-1}$	$\frac{0}{-1}$	$\frac{0.6}{+1}$	4.31/5.06	5.52/5.64	5.4/5.21
5	$\frac{3}{+1}$	$\frac{1}{+1}$	$\frac{0.3}{-1}$	8.77/7.89	9.11/8.54	9.26/9.35
6	$\frac{3}{+1}$	$\frac{0}{-1}$	$\frac{0.3}{-1}$	6.69/7.33	6.98/7.07	6.49/6.55
7	$\frac{0.5}{-1}$	$\frac{1}{+1}$	$\frac{0.3}{-1}$	9.83/9.31	9.37/8.64	9.56/8.98
8	$\frac{0.5}{-1}$	$\frac{0}{-1}$	$\frac{0.3}{-1}$	7.83/8.42	8.61/8.72	7.58/7.61

Примітка. У чисельнику значення для ПФМ₁, у знаменнику – ПФМ₂.



Аналіз даних табл. 4.9 показує, що тенденція до зниження R_{ct}/R_{3t} виявляється по мірі росту як загального вмісту ПФМ, так і збільшення в останньому частки полімерних компонентів (ПВАД і ПВАВ). У світлі сучасних уявлень [64; 78] параметр R_{ct}/R_{3t} у певній мірі характеризує досконалість структури композиційного матеріалу. При сприятливих умовах для утворення структури цементного каменю зменшуються напруги, що виникають у результаті спрямованого росту кристалів при твердінні цементу [140]. Можна припустити, що більш низькі відношення R_{ct}/R_{3t} СУБ із добавками ПФМ обумовлені адсорбційним модифікуванням структури цементного каменю. Відомо [25; 69; 163], що адсорбційною здатністю стосовно полярних поверхонь гідратних новоутворень володіють як СП, так і полівінілацетатний полімер. Останній при достатній кількості утворює, крім того, суцільну плівкову матрицю, що також сприяє підвищеній міцності цементного каменю на розтяг і згин [102].

На рис. 4.11 за даними табл. 4.9 показана кінетика зміни R_{ct}/R_{3t} СУБ із добавками ПФМ по мірі твердіння. Для бетону без добавок і з пониженим вмістом ПФМ, особливо при переважанні СП, характерна тенденція до збільшення R_{ct}/R_{3t} із переходом бетону від раннього до більш пізнього віку. При рості вмісту ПФМ і частки в ньому полімерного компонента співвідношення міцнісних параметрів стабілізується в часі, або навіть може спостерігатися тенденція до зниження R_{ct}/R_{3t} .

Зміна водопоглинання СУБ із добавками ПФМ по мірі зміни їхнього складу (рис. 4.12), як очевидно з аналізу рівнянь Y_3 і Y_8 , добре корелюється з міцністю при стиску, що природно пояснюється близькою залежністю обох властивостей від відкритої пористості бетону. Із збільшенням В/Ц від 0.3 до 0.6 водопоглинання зменшується практично лінійно. При В/Ц=const найбільш істотні розходження у водопоглинанні бетонів, що містять ПФМ різноманітного складу, відзначаються при максимальному вмісті добавки ($X_1=1$). При цьому найменше водопоглинання має бетон, що містить у якості добавки тільки суперпластифікатор. Збільшення вмісту СП у бетоні від 0.5 до 3% дозволяє при В/Ц=0.45 ($X_3=0$) зменшити, наприклад, водопоглинання з 8 до 6.5%, тобто на 18.7%.

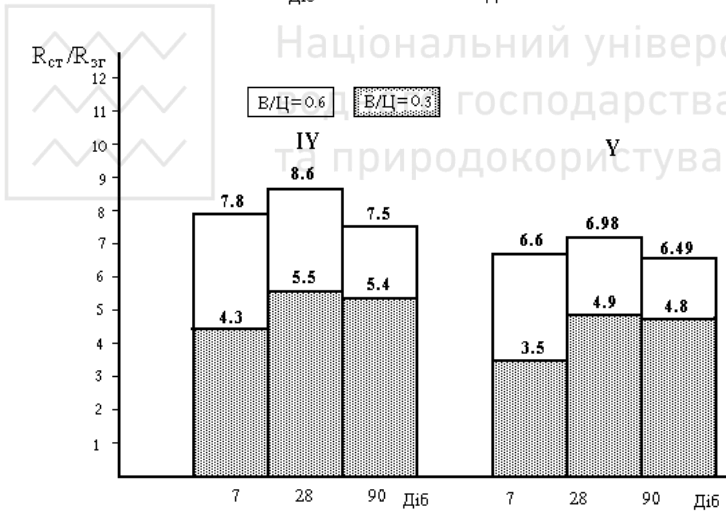
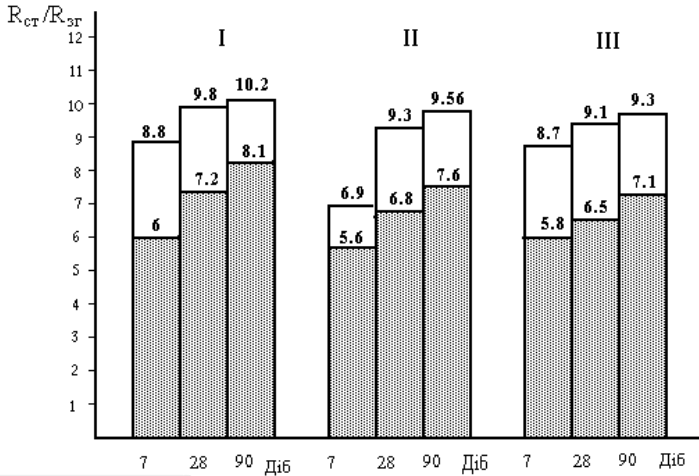
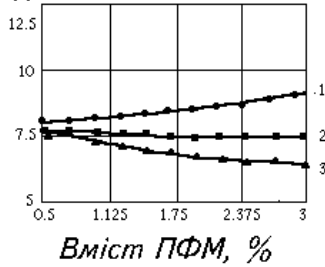


Рис. 4.11. Кінетика зміни $R_{ст}/R_{зг}$ для СУБ із добавками ПФМ₁:
 I – без добавок; II – ПФМ - 0.5%, частка СП у складі ПФМ - 1;
 III – ПФМ - 3%, частка СП у складі ПФМ - 1; IV – ПФМ - 0.5%,
 частка СП у складі ПФМ - 0; V – ПФМ - 3%, частка СП у складі
 ПФМ - 0



а) $W, \%$



б) $W, \%$



в) $W, \%$

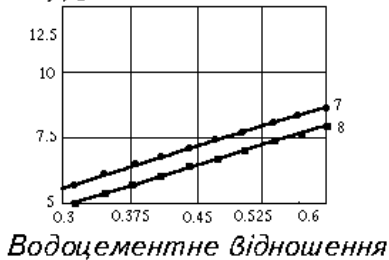


Рис. 4.12. Вплив чинників складу СУБ із добавкою ПФМ₁ на його водопоглинання:

- а) частка СП у складі ПФМ 1 – 0, ($X_3=0$); 2 – 0.5, ($X_3=0$);
3 – 1, ($X_3=0$); б) вміст ПФМ у %: 4 – 0.5; ($X_3=0$); 5 – 1.75,
($X_3=0$); 6 – 3, ($X_3=0$); 7 – 0.5, ($X_2=0$)

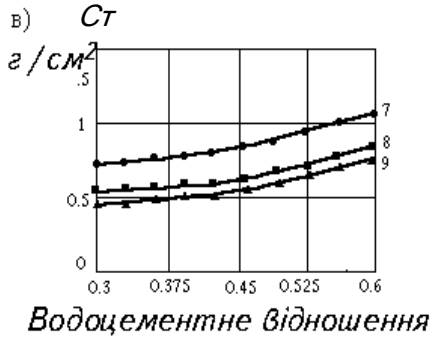
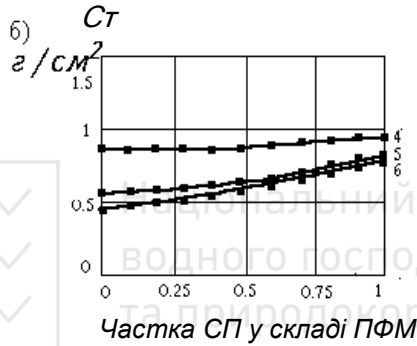
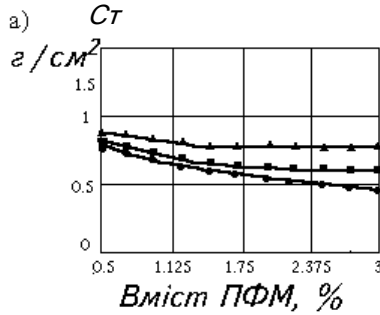


Рис. 4.13. Вплив чинників складу СУБ із добавкою ПФМ₁ на його стиранисть:

- а) частка СП у складі ПФМ: 1 – 0, ($X_3=0$); 2 – 0.5, ($X_3=0$); 3 – 1, ($X_3=0$);
б) вміст ПФМ у %: 4 – 0.5, ($X_3=0$); 5 – 1.75, ($X_3=0$); 6 – 3, ($X_3=0$);
7 – 0.5, ($X_2=0$); 8 – 1.75 ($X_2=0$); 9 – 3($X_2=0$)



Одним їх найбільш істотних переваг полімерцементних бетонів при використанні їх для підлог є їхня знижена стиранність. За даними М. Брокарда [10] полівінілацетатцементний бетон, що зберігався в умовах 50% вологості при полімерцементному відношенні П/Ц=0.05 мав у 3 рази більшу стійкість до стирання, чим звичайні бетони. При П/Ц=0.1 і П/Ц=0.2 цей показник відповідно зріс у 12 і 20 разів. Як показали наші досліді, результати котрих адекватно відбиваються рівняннями Y_{12} і Y_{17} , істотний позитивний ефект ПВАД і ПВАВ на стиранність виявляється і при П/Ц<0.05. При П/Ц=0.03 і В/Ц=0.3 розрахункова стиранність СУБ складає 0.4 г/см^2 , у той же час як при П/Ц=0.005-0.755 г/см^2 , тобто в 1.88 рази більше. Додаткові досліді показали, що стиранність СУБ без добавок складала 0.79 г/см^2 .

Деякий позитивний ефект на стиранність СУБ, хоча і значно менший ніж добавки ПВАД і ПВАВ, робить і добавка Melflux 2651f, що можна пояснити її впливом на міцність при В/Ц=const (рис. 4.13). Між останньою і стиранністю при інших постійних умовах, за нашими даними, простежується чітка залежність.

Аналіз отриманого комплексу рівнянь регресії показує, що сумарний вплив компонентів досліджуваних ПФМ є, як правило, адитивним.

Ефект обох полімерних компонентів досліджуваних ПФМ, отриманих на основі полівінілацетата - полівінілацетатної дисперсії (ПВАД) і розчину полівінілацетатверсатата (ПВАВ), дуже близький як якісно, так і кількісно. Вибір складу ПФМ повинний визначатися як нормованими властивостями бетону, так, очевидно, і техніко-економічними міркуваннями.



РОЗДІЛ V ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ САМОУЩІЛЬНЮваних БЕТОНІВ

5.1. Основні вимоги до самоущільнюваних бетонних сумішей та методи випробувань

Цементний, в тому числі цементно-золинний самоущільнюваний бетон, має ряд суттєвих недоліків, навіть при використанні добавок суперпластифікаторів. Це, в першу чергу, високе співвідношення міцності на стиск ($R_{ст}$) до міцності на розтяг (R_p), яке збільшується з віком і класом бетону.

Легкоукладальність самоущільнюваних бетонних сумішей характеризується основними трьома параметрами:

- здатність до заповнення (*filling ability*) – здатність свіжоприготовленої бетонної суміші розтікатися під впливом сили тяжіння або під тиском (наприклад, прокачування насосом) і повністю заповнювати армовану опалубку (форму);
- проникаюча здатність (*passing ability*) – здатність свіжоприготовленої бетонної суміші проникати крізь елементи формоутворення і густе армування без блокування заповнювача;
- стійкість до сегрегації (розшарування) (*resistance to segregation*) – здатність свіжоприготовленої бетонної суміші зберігати однорідність в процесі укладання і розміщення в опалубці (формі).

Кожен з цих трьох параметрів оцінюється незалежно. Ступінь, при якій СУБ повинні мати здатність до заповнення, проникаючу здатність і стійкість до сегрегації, може широко варіюватися в залежності від області застосування (табл. 5.1).

Основні вимоги до СУБ в свіжоприготовленому стані залежать від сфери застосування, зокрема:

- умов формування, пов'язаних з конфігурацією конструкції, розташуванням і густотою армування, наявністю елементів внутрішнього оснащення (порожниноутворювачі і т.п.);
- розміщення обладнання, що подає бетонну суміш (наприклад, насос, автобетонозмішувач, завантажувальний бункер, розподільна воронка для підводного бетонування і т.п.);



– способу формування (наприклад, кількість і положення точок живлення);

– способу доведення поверхні конструкції.

Вимоги до СУБ класифікують відповідно до EN 12350 за такими показниками:

- рухливість - розплив конуса (SF) (табл. 5.2);
- в'язкість (міра швидкості потоку) (VS / VF) (табл. 5.3);
- проникаюча здатність (розтікання без блокування заповнювач) (PA) - два класи (табл. 5.4);
- стійкість до сегрегації (SR) (табл. 5.5).

Таблиця 5.1

Параметри легкоукладальності СУБ

Параметри	Вимоги до застосування
Здатність до заповнення	Більш високі показники потрібні для елементів з важкодоступними місцями: вузьким поперечним перерізом густим армуванням, а також у випадках, коли бетонна суміш повинна тривалий час долати довгі горизонтальні відстані. При високій енергії укладання бетонних сумішей, яка генерується, наприклад, нагнітанням насоса або силою тяжіння при формуванні масивних елементів, потрібне менше значення показника
Проникаюча здатність	Області застосування можуть варіюватися від неармованих або слабоармованих елементів, що не залежать від показника, до тонкостінних, густоармованих елементів, що обумовлює підвищене значення показника
Стійкість до сегрегації	Всі суміші повинні бути стійкими до сегрегації. Вимоги до динамічної стійкості можуть бути вищими для елементів з густим армуванням, в яких бетон піддається вібрації, або у випадках, коли бетонна суміш повинна тривалий час долати довгі горизонтальні відстані або укладатися в опалубку з великої висоти.



Таблиця 5.2

Класи СУБ за рухливістю

Клас	Рухомість (діаметр розпливу конуса, мм)
SF1	від 550 до 650
SF2	від 660 до 750
SF3	від 760 до 850

Таблиця 5.3

Класи СУБ за в'язкістю

Клас	T_{500} , с	V-funnel, с
VS1 / VF1	≤ 2	≤ 8
VS2 / VF2	> 2	От 9 до 25

Таблиця 5.4

Класи СУБ за проникною здатністю

Клас	L-box PA (H_2 / H_1)
PA1	$\geq 0,80$ з двома стержнями
PA2	$\geq 0,80$ з трьома стержнями

Таблиця 5.5

Класи СУБ за стійкістю до сегрегації

Клас	Стійкість до сегрегації, %
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

Відповідність властивостей СУБ підтверджується, якщо зазначені критерії (табл. 5.2-5.5) задовольняють межі значень, зазначених в табл. 5.6.



Критерії відповідності властивостей СУБ

Властивість / клас	Критерій
SF1	$\geq 520, \leq 720$ мм
SF2	$\geq 640, \leq 800$ мм
SF3	$\geq 740, \leq 900$ мм
VS1 / VF1	≤ 10 с
VS2 / VF2	$\geq 7, \leq 27$ с
PA1	$\geq 0,75$
PA2	$\geq 0,75$
SR1	≤ 23
SR2	≤ 18

Нижче наведені типові класи по рухливості для ряду конструкцій:

- SF1 (550-650 мм) рекомендується для:
 - неармованих або слабоармованих залізобетонних конструкцій, які формуються в вертикальній опалубці (наприклад, стінові панелі);
 - конструкцій, які формуються литтям під тиском бетононаосу (наприклад, елементи тунелів);
 - малогабаритних конструкцій;
- SF2 (660-750 мм) може використовуватися для широкої номенклатури звичайних залізобетонних конструкцій (колони, палі, фундаменти, перекриття);
- SF3 (760-850 мм) зазвичай отримують із застосуванням крупного заповнювача з максимальною крупністю зерен менше 20 мм; використовуються для вертикальних елементів густоармованих конструкцій, елементів складної геометричної форми або для заповнення під опалубку (підливи під металоконструкції, опорні плити технологічного обладнання і т.п.).

Суміші з рухливістю понад 850 мм можуть використовуватися в деяких особливих випадках, але при цьому велика увага повинна приділятися забезпеченню стійкості до сегрегації (зокрема, максимальна крупність заповнювачів не



повинна перевищувати 10 мм).

В'язкість можна оцінити за часом T_{500} в ході випробування осадки (розпливу) конуса або за часом витікання бетонної суміші з V-воронки. Отримане значення часу не характеризує безпосередньо в'язкість СУБ, але побічно пов'язане з нею, описуючи швидкість потоку. Бетонна суміш з низькою в'язкістю має дуже високу початкову швидкість потоку, яка потім прискорено зменшується. У свою чергу, суміш з високою в'язкістю може продовжувати повзти (розтікатися) протягом тривалого часу.

В'язкість (низька або висока) повинна нормуватись тільки в особливих випадках. Суміш класу VS1 / VF1 має хорошу здатність до заповнення навіть в густоармованих конструкціях. Вона є самонівелюючою і забезпечує високу якість поверхні, однак схильна до водовідділення і сегрегації. Суміш класу VS2 / VF2 з підвищеним показником часу розтікання, як правило, виявляє тиксотропний ефект, який може бути корисним в обмеженні тиску на опалубку або для підвищення стійкості до сегрегації. Негативні наслідки можуть виникнути щодо якості поверхні (поверхневі пори) і чутливості до зупинок або затримками між послідовними формуваннями.

Приклади специфікацій за показником проникаючої здатності:

- суміш класу PA1 – для конструкцій з мінімальною шириною перерізу від 80 до 100 мм (наприклад, конструкції для цивільного будівництва);
- суміш класу PA2 – для конструкцій з мінімальною шириною перерізу від 60 до 80 мм (наприклад, конструкції інженерних споруд).

Для конструкцій з шириною перерізу понад 100 мм показник проникаючої здатності не нормується, а для тонкостінних конструкцій (ширина зазору менше 60 мм) необхідні спеціальні випробування.



Методи випробувань

Згідно EN 12350 пропонуються чотири основні методи випробувань самоущільнюваних бетонних сумішей:

1. Визначення рухливості з використанням стандартного конуса (загальний діаметр розпливу і час розпливу в колі діаметром 500 мм, T_{500} , с) (рис. 5.1). Застосовується в першу чергу для оцінки здатності до заповнення (filling ability) та може використовуватися як в лабораторних, так і польових умовах.



Рис. 5.1. Визначення розпливу конуса (Slump flow) – (а) та часу розпливу (slump flow time T_{500}) (б)

– заповнення і вирівнювання бетонної суміші в пристрої «L-box» (рис. 5.2). Застосовується, в першу чергу, для оцінки



проникаючої здатності (passing ability), підходить для використання в лабораторіях;

- визначення рухливості з використанням стандартного конуса і блокувального кільця «J-ring» (рис. 5.3). Застосовується для оцінки проникаючої здатності (passing ability). Може використовуватися як в лабораторних, так і польових умовах;
- ситовий аналіз. Застосовується для оцінки стійкості бетонної суміші до сегрегації; може використовуватися як в лабораторних, так і польових умовах.

Узагальнені кількісно-якісні критерії легкоукладальності СУБ для різної номенклатури залізобетонних конструкцій наведені в табл. 5.7.



Рис. 5.2. Визначення проникної здатності (L-box test)

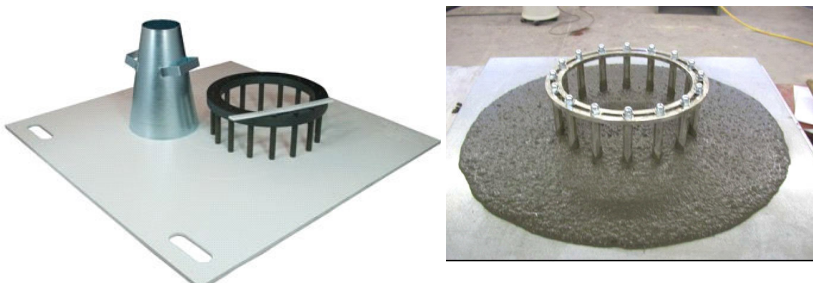


Рис. 5.3. Визначення розпливу конуса через блокувальне кільце (J-ring test)



Таблиця 5.7

Узагальнені кількісно-якісні критерії легкоукладальності СУБ

Властивість	Значення, мм	Відповідність критерію області застосування
Розплив конуса	550-610	Підходить для бетонних або залізобетонних елементів з малою густиною армування, при коротких відстанях транспортування (укладання) бетонних сумішей в опалубку або при високій енергії укладання
	610-700	Підходить для широкої номенклатури звичайних залізобетонних виробів і конструкцій
	700-780	Підходить для густоармованих, складних за формою, тонкостінних конструкцій, при великих відстанях транспортування бетонних сумішей до опалубки (формі) або низької енергії розподілу суміші в опалубці (формі)
T_{500}, c (стійкість до сегрегації)	<2	Низька стійкість
	2-7	Прийнятна, показник не повинен змінюватися, більш ніж на 3 с між партіями бетонних сумішей
	> 7	Прийнятна, може мати погіршену легкоукладальність
Розплив конусу через блокувальне кільце (J-Ring) Δh , мм	<13	Підходить для густоармованих, складних за формою, тонкостінних конструкцій
	13-25	Підходить для широкої номенклатури звичайних залізобетонних виробів і конструкцій
	> 25	Підходить для бетонних або залізобетонних елементів з малою густиною армування
Ситовий аналіз (стійкість до сегрегації), %	<5	висока стійкість
	5-10	прийнятна
	10-15	гранично допустима
	> 15	недостатньо забезпечується



5.2. Склад самоущільнюваних бетонних сумішей і вимоги до вихідних матеріалів

Принципи підбору складу. Однією з ключових умов отримання самоущільнюваних бетонних сумішей є застосування ефективних водоредуруючих добавок (суперпластифікаторів) з відносно високим вмістом дисперсних матеріалів у вигляді портландцементу, мінеральних добавок, мелених наповнювачів і (або) дуже дрібного піску. При цьому ефективність суперпластифікаторів проявляється в їх здатності зберігати технологічні властивості бетонних сумішей протягом часу, необхідного для формування виробів, а також в мінімізації уповільнюючого ефекту на процеси тужавлення і твердіння бетонних сумішей і бетонів.

Для забезпечення комплексу технологічних, фізико-механічних та експлуатаційних властивостей СУБ, слід дотримуватись таких умов.

1. Текучість і в'язкість цементної пасти регулюються і корегуються ретельним підбором і дозуванням цементу і мінеральних добавок (наповнювачів) при обмеженні водов'язуючого співвідношення, додаванням суперпластифікатора і (при необхідності) модифікатора в'язкості. Правильне співвідношення цих компонентів СУБ, їх сумісність та взаємодія є ключовим фактором досягнення високої здатності до заповнення армованої опалубки і стійкості суміші до сегрегації.

2. Для контролю тепловиділення при гідратації цементу і запобігання термічного тріщиноутворення, а також регулювання темпів зростання міцності бетону рекомендується досить високий вміст пуцоланових добавок для забезпечення витрати цементу на прийнятному рівні.

3. Цементна паста забезпечує переміщення в об'ємі бетонної суміші зерен заповнювача а, отже, об'єм розчину повинен бути більшим об'єму порожот в заповнювачі, таким чином, щоб всі окремі зерна були повністю покриті "мастильним" шаром розчину. Це зменшує тертя між зернами заповнювача і збільшує текучість бетонної суміші.



4. Відношення вмісту крупного заповнювача до дрібного зменшується таким чином, щоб окремі зерна крупного заповнювача були повністю покриті шаром розчину. Це знижує ризик блокування заповнювача у випадках, коли бетонна суміш долає вузькі отвори в опалубці або проміжки між арматурою і збільшує проникаючу здатність СУБ.

Наступні принципи проектування СУБ обумовлюють їх основні відмінності від звичайних бетонних сумішей, які укладаються і ущільнюються методом вібраційного формування:

- менший вміст крупного заповнювача;
- підвищений вміст в'язучої пасти;
- застосування мінеральних наповнювачів або пуцоланових добавок;
- низьке значення водо-в'язучого відношення;
- підвищена витрата суперпластифікатора;
- використання модифікатора в'язкості (за необхідності).

Вимоги до вихідних матеріалів

Цемент. Всі цементи, що відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-46: 2010 (EN 197-1), можуть бути використані для виробництва СУБ. Обґрунтування вибору типу цементу, як правило, диктується конкретними вимогами по області застосування і умов експлуатації будівельної конструкції, виготовленої з СУБ.

Мінеральні добавки. Внаслідок специфічних вимог до свіжоприготовлених СУБ в їх складі використовують інертні та пуцоланові / гідралічні мінеральні добавки, які підвищують когезію бетонних сумішей та їх стійкість до сегрегації. Використанням добавок можна регулювати вміст цементу з метою зменшення теплоти гідратації і ризику термічного тріщиноутворення.

Наповнювачі. Гранулометричний склад, форма зерен і водопоглинання мінеральних наповнювачів можуть впливати на водопотребу сумішей, а, отже, їх придатність до використання при виготовленні СУБ. Мінеральні наповнювачі на основі карбонату кальцію (наприклад, вапняк) широко



використовуються для забезпечення необхідних реологічних властивостей і легкоукладальності бетонних сумішей.

Для СУБ доцільно використовувати фракції наповнювача з розміром зерен менше, ніж 0,125 мм, а кількість частинок, що проходять через сито 0,063 мм, має становити не менше 70%. З цієї причини більшість наповнювачів використовують в помеленому стані.

Зола-винос. Зола-виносу є ефективною добавкою для СУБ, що забезпечує підвищену когезію і знижену чутливість до змін вмісту води. Однак, високі витрати золи можуть привести до утворення в'язучої пасти з дуже високою когезією, що знижує показники легкоукладальності.

Мікрокремнезем. Дуже високий рівень дисперсності і практично сферична форма зерен мікрокремнезема (кремнеземистого пилу) забезпечує належну когезію і підвищену стійкість до сегрегації. Однак, мікрокремнезем також істотно знижує водовідділення в бетонній суміші, що може привести до проблеми забезпечення якості поверхні в зв'язку з швидким утворенням поверхневої кірки, яка ускладнює виконання операцій з доведення виробів.

Метакаолін. В значній мірі, може замінювати високоартисний мікрокремнезем. Додавання метакоаліну до складу СУБ сприяє збільшенню міцності цементного каменю, адгезії цементного гелю до частинок заповнювача, зниженню пористості і зменшенню проникності, підвищенню стійкості матеріалу до циклічного замерзання відтавання, а також до корозійних впливів. Внаслідок високої дисперсності, зазвичай зростає водопотреба цементних систем. Для зниження цього негативного фактора необхідно використовувати суперпластифікатори.

Мелений доменний гранульований шлак. Мелений доменний гранульований шлак містить тонкодисперсні реакційно здатні фракції з низькою теплою гідратації. Доменний гранульований шлак вже присутній в деяких типах цементу (ПЦ II або ШПЦ III), але також може використовуватися як добавка до бетонних сумішей. При цьому слід враховувати, що високий вміст шлаку може впливати на



легкоукладальність СУБ, а його дуже повільна гідратація збільшує ризик сегрегації і водовідділення.

Заповнювачі. Основними властивостями заповнювачів, що впливають на характеристики СУБ, є максимальний розмір зерен, гранулометричний склад і форма зерен (в т.ч. вміст зерен лещадної та голчастої форми). Всі ці фактори повинні розглядатися разом. Наприклад, покращення гранулометричного складу заповнювача (збагачення) додаванням певних фракцій кутастих шорсткуватих частинок може бути несприятливим з точки зору забезпечення необхідного рівня легкоукладальності СУБ.

Вимоги до максимального розміру зерен заповнювача, які наведені в нормативних документах для звичайного бетону (наприклад, Посібник до ДБН А.3.1-7-96), – менше третини мінімальної товщини виробу і трьох чвертей відстані між стержнями арматури (крім випадків, обумовлених в проєкті), як правило, застосовуються і до СУБ. Зменшення максимальної крупності зерен заповнювача може позитивно впливати на показники проникаючої здатності і стійкості до сегрегації. Однак ці переваги повинні оцінюватися з урахуванням необхідності збільшення обсягу в'язучої пасту і пов'язаним з цим прямим або непрямим впливом на властивості затверділого бетону.

Гранулометричний склад (піщано-щебенева співвідношення, П/Щ) повинен розглядатися в сукупності для крупного та дрібного заповнювача. Значення П/Щ, як правило, коливається між 0,40 і 0,50 для СУБ. Більш високе його значення зазвичай пов'язане з підвищенням стійкості до сегрегації.

Слід уникати явно вираженої переривчастої гранулометрії заповнювача, в той час як відсутність деяких фракцій в суміші заповнювачів допускається. Хоча зерновий (фракційний) склад заповнювачів істотно не впливає на стійкість до сегрегації, реологічні (технологічні) властивості СУБ в значній мірі залежать від цього показника.

Форма зерен і характер поверхні заповнювачів істотно впливають на легкоукладальність самоущільнюваної бетонної



суміші. Добре округлі зерна з незначною кількістю частинок лещадної або голчастої форми мають невелику питому поверхню і, відповідно, водопотребу, що дозволяє використовувати менший обсяг пасти в'язучого. Це забезпечує зниження в'язкості СУБ і зменшення дозування суперпластифікатора. У свою чергу, зерна неправильної форми з шорсткою рваною поверхнею значно збільшують питому поверхню і водопотребу заповнювача.

Значення вологості, водопоглинання, зернового складу всіх заповнювачів повинні постійно контролюватися, їх відхилення від нормативних значень (ДСТУ Б В.2.7-32-95, ДСТУ Б В.2.7-75-98) повинні враховуватися з метою отримання СУБ постійної якості. Використання промитих, класифікованих наповнювачів, як правило, забезпечує суттєве підвищення показників якості бетонної суміші і затверділого бетону.

Вплив дрібного заповнювача на властивості свіжовиготовленого СУБ значно більший, ніж крупного. Фракції розміром менше 0,125 мм повинні бути включені в загальний вміст дрібних частинок, а також враховуватися при розрахунку водо-твердого співвідношення і дозування суперпластифікатора.

Хімічні добавки. Вибір добавок для оптимальних показників якості СУБ залежить від фізичних і хімічних властивостей в'язучого / мінеральної добавки. Такі фактори як тонкість помелу, вміст лугів і C_3A в портландцементі, вміст незгорілого вуглецю (втрати при прожарюванні) в мінеральних добавках, можуть мати істотний вплив на сумісність з хімічними добавками. Тому одним з основних умов правильного застосування хімічних добавок є обов'язкове дослідження їх сумісності з мінеральними компонентами. Це необхідно робити також у випадках зміни постачальника складових компонентів СУБ.

Добавка *суперпластифікатора* повинна забезпечувати скорочення витрати води замішування і запроєктовані показники легкоукладальності. У той же час, добавка повинна підтримувати свій диспергуючий ефект протягом часу, необхідного для транспортування і укладання СУБ. Необхідний рівень збереження рухливості залежить від області



застосування. Бетон для збірних виробів і конструкцій вимагає меншої тривалості збереження рухливості, ніж для монолітного будівництва.

Модифікатори в'язкості (VMA) підвищують когезію бетонних сумішей без істотного впливу на їх текучість. Ці добавки використовують в СУБ для мінімізації впливу варіацій вологості, вмісту пиловидних частинок і зернового складу в пісках, що робить СУБ більш стабільними і менш чутливими до незначних змін в пропорціях і властивостях інших компонентів.

Повітровтягувальні добавки можуть бути використані при виробництві СУБ з метою підвищення морозостійкості бетону. Залучення повітря є особливо корисним для стабілізації властивостей сумішей з низьким вмістом дисперсних компонентів, проте знижує міцність бетону.

5.3. Загальні принципи підбору складу самоущільнюваного бетону та приготування суміші

Відповідно до рекомендацій Європейської федерації фахівців з будівельної хімії та бетону (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) при підборі складу бетону доцільніше використовувати співвідношення вихідних компонентів не за масою, а за об'ємом. На першому етапі встановлюються співвідношення між компонентами на основі типових діапазонів їх вмісту, що забезпечують нормовані показники самоущільнюваної бетонної суміші:

- співвідношення вода/порошок (цемент, мінеральна добавка, фракції піску дрібніше 0,125 мм) за об'ємом – від 0,80 до 1,10;
- загальний вміст дисперсних матеріалів – від 160 до 240 літрів (400-600 кг) на кубічний метр;
- вміст цементу – 350-450 кг/м³ (витрата цементу понад 500 кг/м³ може збільшити усадку і повзучість бетону; витрата менше 350 кг/м³ може бути прийнятним тільки при використанні інших дрібнодисперсних мінеральних наповнювачів або пуцоланових добавок);
- вміст крупного заповнювача – від 28 до 35% за об'ємом



бетонної суміші;

- водо-цементне відношення призначається виходячи з вимог EN 206-1; зазвичай вміст води не перевищує 200 л/м^3 ;
- вміст піску визначається як різниця загального об'єму бетонної суміші і об'ємів крупного заповнювача і цементної пасти.

Подальше коректування складу може бути необхідним для забезпечення вимог до затверділому бетону, зокрема міцності.

У табл. 5.8 наведені орієнтовні діапазони складових СУБ за масою і об'ємом. Ці пропорції не є гранично визначені, і значна кількість самоущільнюваних бетонних сумішей мають інші значення вмісту одного або декількох компонентів.

Таблиця 5.8

Орієнтовний діапазон витрати компонентів СУБ

Компонент	Витрата матеріалу за масою, кг/м^3	Витрата матеріалу за об'ємом л/м^3
В'яжуче + наповнювач	380-600	
Пасти в'яжучого + наповнювач	-	300-380
Вода	150-210	150-210
Крупний заповнювач	750-1000	270-360
Дрібний заповнювач	Кількість врівноважує об'єм інших складових, як правило, 48-55% від загального обсягу	
Водо-в'яжуче відношення	-	0,85-1,10

Самоущільнюваний бетон може бути приготовлений в будь-якому бетонозмішувачі, в тому числі в лопатевих змішувачах періодичної дії, але краще використовувати змішувачі неперервної дії. Проте, при виробництві СУБ особливо важливо, щоб змішувач був в хорошому стані і міг забезпечити повне і рівномірне змішування твердих матеріалів з достатнім зусиллям зсуву для диспергування і активації суперпластифікатора.



Час, необхідний для досягнення повного перемішування СУБ може бути трохи більшим, ніж для звичайного бетону за рахунок зниження сил тертя і досягнення повної активації суперпластифікатора. Важливо проводити попередні випробування, щоб встановити ефективність окремих змішувачів і оптимальну послідовність при додаванні компонентів. Об'єм бетону для попередніх випробувань повинен бути не менше, ніж половина потужності змішувача.

Перед початком поставок бетонних сумішей рекомендується провести випробування на заводі для того, щоб в повному масштабі виробництва перевірити, чи відповідає бетонна суміш і затверділий бетон пропонованим до них вимогам.

Високий вміст наповнювачів і текучість СУБ може впливати на отримання однорідної суміші. Основна складність полягає в формуванні не перемішаних «агломератів» зі складових компонентів, які досить проблематично диспергувати при перемішуванні. Найчастіше «агломерація» відбувається в змішувачах періодичної дії.

Час перемішування повинен контролюватися, оскільки його зміна може змінювати властивості бетонної суміші. При використанні модифікатора в'язкості краще додавати його в кінці перемішування. Стандартна процедура перемішування приймається після проведення пробних замісів на заводі-виробнику і її необхідно дотримуватися для зменшення різниці якості бетонної суміші в різних партіях.

Добавки не повинні додаватися безпосередньо в сухі складові бетонної суміші. Їх необхідно додавати разом з водою замішування. Також різні типи добавок не повинні змішуватися разом до дозування, якщо це спеціально не обумовлено виробником. Це також відноситься і до можливості змішування різних добавок в дозаторі. Якщо використовуються повітровтягувальні добавки, то найкраще їх додавати перед суперпластифікатором і в той час, коли бетон ще має рідку консистенцію.

У зв'язку з потужним ефектом сучасних суперпластифікаторів важливо, щоб дозатори проходили



регулярну перевірку, і обладнання мало високу точність дозування. Якщо, для виготовлення партії СУБ потрібно більше одного дозування компонентів, то необхідно контролювати суму окремих додавань.

У процесі виробництва, може бути безліч факторів, які індивідуально або спільно змінюють однорідність суміші. Основними факторами є зміна кількості вільної вологи, розподіл частинок в об'ємі бетону і зміна послідовності дозування. Також, можна спостерігати зміну властивостей, при введенні до складу компонентів з інших партій. Оскільки, як правило, відразу не представляється можливим визначити причину зміни властивостей СУБ, рекомендується проводити корегування консистенції бетонної суміші шляхом зміни кількості введеного суперпластифікатора

Завантаження складових матеріалів рекомендується проводити в наступній послідовності: приблизно дві третини води замішування додають в змішувач, потім слідує заповнювачі, наповнювачі і цемент. Однорідну суміш отримують, додаючи залишок води і суперпластифікатор. Якщо використовується VMA, то його додають після суперпластифікатора і безпосередньо перед остаточною корегуванням консистенції бетонної суміші водою.

Для автобетонозмішувачів, швидше за все, буде потрібний додатковий час перемішування, так як вони менш ефективні, ніж заводські змішувачі. Поділ партії на дві або більше серій може поліпшити ефективність змішування. Особливо важливим є стан барабану автобетонозмішувача і змішувальних лопатей для СУБ, і вони повинні регулярно перевірятися. Швидкість обертання барабана під час циклу змішування повинна відповідати рекомендаціям заводу-виготовлювача, але швидкість перемішування для СУБ зазвичай знаходиться в діапазоні 10-15 обертів за хвилину.



5.4. Розрахунок складу СУБ

При підборі складу СУБ за методикою Х.Окамури [39] спочатку обирається пластифікуюча добавка, активний наповнювач і встановлюється В/Ц, що забезпечує отримання "цементного молока" з необхідною текучістю. На другому етапі підбираються витрати заповнювачів, їх співвідношення, коригуються витрати суперпластифікатора і води, для отримання заданої текучості бетонної суміші. При цьому для виключення розшарування необхідне досить високе розсунення крупного заповнювача цементно-піщаним розчином.

Важливе значення має мінімізація в заповнювачах глинистих або мулистих частинок, які адсорбуються полікарбоксилатами і блокують їх дію на цемент.

У табл. 5.9 наведено приклад складу СУБ, підбраного по вказаній методиці, а в табл. 5.10 – показники його міцності. У бетонах використаний суперпластифікатор на основі ефіру полікарбоксилату. Показники розпливу бетонної суміші визначали за допомогою конуса з висотою 60 мм, нижньою основою 75 мм, верхньою основою 100 мм.

Таблиця 5.9

Склади СУБ

№	Клас бетону	Витрати матеріалів, кг/м ³						
		цемент	пісок *	щебінь фракції 5-20 мм	зола-винос	доменний шлак	суперпластифікатор	вода
1	B30	300	1000	750	30	150	3,5	211
2	B35	450	1000	750	100	100	3,5	256
3	B40	430	1000	750	70	100	3,5	230

* В якості піску використані відсівы подрібнення щебеню.

При проектуванні складів СУБ рекомендовано передбачати застосування цементів ПЦ I або ПЦ II з нормальною густиною не більше 26% і вмістом С₃A не більше 8%, пісків з модулем крупності від 1,1 до 3,0, крупних заповнювачів фракції не більше 20 мм.



В якості добавок крім суперпластифікаторів з високою водоредукуючою здатністю можливе використання стабілізуючих (водоутримуючих) добавок. Поряд з активними мінеральними добавками (мікрокремнезем, зола-виносу, метакраолін, мелені доменні гранульовані шлаки, природні пуцолани) можуть використовуватися інертні мінеральні порошки, наприклад, кам'яне борошно.

Таблиця 5.10

Властивості СУБ
(Склади наведені в табл. 5.9)

№	Розплив конусу, мм	Міцність при стиску, МПа		
		3 доби	7 діб	28 діб
1	60	23	29	38
2	65-70	28	36	46
3	60	29	33	49

Для підвищення сегрегаційної стійкості бетонних сумішей доцільне застосування полімерної або сталеві фібри довжиною не більше 20 мм.

Витрата цементу в складі самоущільнюваного бетону змінюється в діапазоні від 300 до 500 кг/м³ для важкого бетону і від 400 до 650 кг/м³ для дрібнозернистого бетону. Загальна кількість тонкодисперсних компонентів, що включають цемент і мінеральні добавки повинна знаходитися в діапазоні від 550 до 600 кг/м³. Загальний об'єм тіста з тонкодисперсних компонентів бетонної суміші становить від 0,35 до 0,40 м³/м³.

Абсолютний об'єм наповнювачів в складі бетонної суміші розраховується з урахуванням об'єму втягнутого повітря:

$$V_3 = 985 - B/\rho_v - Ц/\rho_{ц} - M/\rho_m, \quad (5.1)$$

де $Ц$, B , M – витрати цементу, води та мінеральних добавок;
 ρ_v , $\rho_{ц}$, ρ_m – густина води, цементу і зерен мінеральних добавок.

Частка піску в об'ємі розчинової частини бетонної суміші СУБ рекомендується в діапазоні 40-50%. У крупному



заповнювачі рекомендується співвідношення фракцій 5(3)-10 мм і 10-20 мм на рівні 60:40 мас.%. Остаточні склади бетону підбираються після експериментальної перевірки і коригування. Г.В. Несветаев [125], обробивши результати ряду дослідників, запропонував розрахункові залежності для визначення складів самоущільнюваного бетону. Для розрахунку В/Ц пропонується усереднена залежність:

$$R_{\sigma} = \frac{0,36R_u}{(B/C)^{1,3885}} \quad (5.2)$$

Попереднє визначення водовмісту рекомендується за формулою:

$$B_0 = (W_u C + W_n H + W_{II} II + W_{III} III) \cdot k_{SF}, \quad (5.3)$$

де W_u , W_n , W_{II} , W_{III} – відповідно водопотреба цементу (0,24-0,28), піску (0,04-0,08), наповнювача (0,15-0,3) та щебеню (0,02-0,04); k_{SF} – коефіцієнт, що враховує вплив суперпластифікатора на водопотребу бетонної суміші (0,7-0,85).

Поліакрилатні і полікарбоксилатні суперпластифікатори, будучи найбільш ефективними з позицій пластифікуючого і водоредукуючого ефектів мають, як правило, порівняно високу вартість. Для зниження вартості і забезпечення поліфункціонального ефекту можливе застосування комплексних добавок, що складаються з двох або більше компонентів, коригувальних, доповнюючих, а в деяких випадках, підсилюючих дію кожного з них. Нашими дослідженнями, проведеними на бетонах із застосуванням середньоалюмінатного портландцементу Здолбунівського заводу ПЦ П-М500, меленого гранульованого шлаку, в кількості 20% від маси цементу, середньозернистого кварцового піску і гранітного щебеню фракції 5-20 мм показано, що водоредукуючий ефект, близький до ефекту полікарбоксилатного суперпластифікатора Melflux (25-30%), можна отримати, застосовуючи композицію його з добавками ЛСТМ і С-3 в рівних співвідношеннях.

Комплексна добавка з урахуванням водоредукуючого ефекту дає приріст міцності в однодобовому і 28-добовому віці



близький до ефекту добавки Melflux (табл. 5.11).

Таблиця 5.11

Водоредукуючий ефект добавок і приріст міцності СУБ

Добавки	Співвідношення за масою	ВРЕ, %	ΔR_{σ}^I	ΔR_{σ}^{28}
C-3	–	15,22	52,49	24,55
Melflux	–	31,30	51,72	43,18
ЛСТМ+С-3	1:1	19,57	30,78	15,60
ЛСТМ+ Melflux	1:1	32,61	50,44	28,57
С-3+ Melflux	1:1	28,26	53,87	46,08
ЛСТМ+С-3+ Melflux	1:1:1	30,43	47,50	40,86

Примітка. Загальний вміст добавки 0,5% від маси цементу.

Цементно-водне відношення досліджених самоущільнюваних бетонів можна розраховувати на основі формули:

$$R_{\sigma} = AR_{\sigma}[(C + H)/B - \epsilon], \quad (5.4)$$

де $A = 0,6$, $\epsilon = 0,8$;

H – вміст дисперсного наповнювача (меленого шлаку).

Витрата води при введенні суперводоредукуючої добавки, якою є добавка Melflux 2651F, використана в дослідженнях при середньому дозуванні 2 кг на 1 м³ становила при розпливі конусу 600 мм – 230 л, 700 мм – 255 л.

Отримані дані дозволили розраховувати номінальні склади самоущільнюваних бетонів при прийнятих і зазначених вище конкретних умовах. Нижче наведено приклад такого розрахунку.

Приклад. Розрахувати номінальний склад самоущільнюваного бетону класу SF1 з міцністю при стиску в 28 денному віці 40 МПа. Марка використовуваного цементу М500. Густина цементу $\rho_{\text{ц}} = 3,1$ г/см³; піску $\rho_{\text{п}} = 2,63$ г/см³;



щебеню $\rho_{щ} = 2,67 \text{ г/см}^3$.

1. З рівняння (5.4) знаходимо відношення $(Ц+H)/B$.

$$\frac{Ц + H}{B} = \frac{R_o + AR_{це}}{AR_{ц}} = \frac{40 + 0,6 \cdot 0,8 \cdot 50}{0,6 \cdot 50} = \frac{64}{30} = 2,1.$$

2. Вміст в'язучого можна знайти прийнявши витрату води для отримання СУБ з розпливом конусу 600 мм (клас SF1) 230 л/м^3 .

$$Ц + H = B \cdot \frac{Ц + H}{B} = 230 \cdot 2,1 = 480 \text{ кг/м}^3.$$

3. Приймаючи, що в складі в'язучого міститься 20% наповнювача – меленого шлаку знайдемо витрати цементу (Ц) і шлаку (Ш):



$$Ш = 480 \cdot 0,2 = 96 \text{ кг/м}^3;$$

$$Ц = 480 - 96 = 384 \text{ кг/м}^3.$$

4. Знайдемо витрату заповнювачів з урахуванням можливого об'єму втягнутого повітря 1,5%.

$$V_{зан} = 985 - \frac{480}{3,1} - 230 = 600 \text{ кг/м}^3.$$

5. Приймаємо, що частка піску в об'ємі заповнювача повинна бути 0,5. Тоді витрата піску за масою:

$$П = (600 \cdot 0,5) \cdot 2,63 = 789 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата щебеню:

$$Щ = (600 \cdot 0,5) \cdot 2,67 = 801 \text{ кг/м}^3.$$

Розрахунковий номінальний склад бетону:

$Ц=384 \text{ кг/м}^3$; $Ш=96 \text{ кг/м}^3$; $П=789 \text{ кг/м}^3$; $Щ=801 \text{ кг/м}^3$;
 $B=230 \text{ л/м}^3$. Додаток Melflux 2651f – 2 кг/м^3 .



5.5. Дослідно-промисловий випуск самоущільнюваних бетонів та фібробетонів

Для визначення фізико-механічних властивостей бетонних сумішей, а також властивостей високоміцних бетонів та сталевфібробетонів виготовлених згідно рекомендацій та за рецептурою, розроблено кафедрою технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування було виконано дослідно-промисловий випуск двох партій бетонних сумішей для виготовлення самоущільнюваних бетонів та фібробетонів у виробничо-технічних умовах підприємства ППФ «Торгбудсервіс» а також були виготовлені конструктивні елементи, а саме буро-залівні палі опори мосту із самоущільнюваного бетону у виробничо-технологічних умовах підприємства ТОВ «Семікс бетон» при будівництві північної об'їзної дороги м. Рівне.

Було виготовлено дослідні партії самоущільнюваних бетонних сумішей для виготовлення бетонів та фібробетонів класу С 32/40. Самоущільнювані бетонні суміші виготовлені відповідно до ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1:2000, NEQ) «Суміші бетонні та бетон».

Для виготовлення бетонних сумішей використані наступні сировинні матеріали:

- портландцемент ПЦ І – 500 за ДСТУ Б В.2.7-46:2010, виробництва ПАТ «Волинь-Цемент»;
- суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux 2651 F. Виробник BASF Constraction Polymers, Тростберг, Німеччина,
- пісок середньої крупності ($M_{кр} = 1,95 \dots 2,15$) з родовищ Славутського району Хмельницької обл.,
- мелений доменний гранульований шлак з питомою поверхнею понад $350 \text{ м}^2/\text{кг}$,
- щебінь гранітний фракції 2-5 мм та 5-10 мм Вирівського кар'єру Рівненської області.
- фібра базальтова РБР-18-г10 ТЗОВ «Технобазальт-Інвест» (м. Київ) довжиною 12 мм, виготовлену із базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009.



Склади пропонованих самоущільнюваних бетонних сумішей наведені у табл. 5.12.

Таблиця 5.12

Склади самоущільнюваних бетонних та фібробетонних сумішей

№	Компоненти	Бетон, кг/м ³	Фібробетон, кг/м ³
1	Цемент ПЦ I-500	410	420
2	Вода	210	215
3	Щебінь фракції 2-5 мм	405	955
4	Щебінь фракції 5-20 мм	665	-
5	Зола	160	160
5	Пісок	635	760
5	Базальтова фібра	-	2
7	Суперпластифікатор Melflux 2651 F	4,5	4,6

Бетонні та фібробетонні суміші готувалися в змішувачах примусової дії. Дозування матеріалів виконувалося з точністю для цементу, води, добавок і фібри до 1%, для заповнювачів – з точністю до 2%. Рухомість бетонної суміші складала 25...27 см, що відповідає марці за осадкою конуса S5 згідно ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Розплив складав суміші 570...610 мм для фібробетону (марка F5 за ДСТУ Б В.2.7-176:2008 та клас SF1 за EN 12350-8) та 660...680 мм для бетону (марка F6 за ДСТУ Б В.2.7-176:2008 та клас SF2 за EN 12350-8).

Після виготовлення зразків були визначені їх нормативні показники якості за ДСТУ Б В.2.6-214:2009. Випробування проводилися в Науково-дослідній лабораторії будівельних матеріалів і виробів (свідоцтво про атестацію № РТ-038/2019 від 27.08.2019 р.).

Результати випробувань, наведені в табл. 5.13, свідчать про те, що фактичні значення розпливу самоущільнюваних бетонних сумішей а також міцності бетону і фібробетону, який виготовлений у виробничих умовах відповідає нормативним значенням.



Таблиця 5.13

Результати випробувань запропонованих складів
самоущільнюваних бетонних та фібробетонних сумішей

№ партій	Рухомість суміші, ОК, см	Марка за осадкою конуса (ДСТУ Б В.2.7-176)	Розплив суміші, см	Клас за розпливом (EN 12350-8)	Показники бетону у віці 28 діб	
					Середня густина, кг/м ³	Міцність, при стиску діб, МПа
Важкий бетон С 32/40						
Б-1	27	S5	675	SF2	2365	43,5
Б-2	26	S5	660	SF2	2380	41,2
Б-3	27	S5	680	SF2	2370	41,8
Фібробетон С 32/40						
Ф-1	25	S5	570	SF1	2395	44,3
Ф-2	26	S5	610	SF1	2390	42,8

При будівництві північної об'їзної дороги м. Рівне були виготовлені конструктивні елементи, а саме буро-залівні палі опори мосту із самоущільнюваного бетону (рис. 5.4), склад якого запропоновано та попередньо перевірено кафедрою ТБВіМ Національного університету водного господарства та природокористування.

Найменування конструкцій та об'єм бетонування наведено в табл. 5.14.

Для виготовлення самоущільнюваних бетонних сумішей були використані наступні матеріали:

- портландцемент СЕМ 1 42.5 R, виробництва ПАТ «Волинь-Цемент»;
- суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux 2651 F. Виробник BASF Construction Polymers, Тростберг, Німеччина,
- пісок середньої крупності (Мкр =2,0...2,15) з родовищ Славутського району Хмельницької обл.,
- мелений доменний гранульований шлак з питомою поверхнею понад 350 м²/кг,
- щебінь гранітний фракції 2-5 мм та 5-10 мм Вирівського кар'ру Рівненської області.



Рис. 5.4. Виготовлення буро-залівних паль у виробничих умовах ТОВ «Семікс бетон»

Таблиця 5.14

Відомості про бетоновані конструкції

№ з/п	Назва конструктивного елемента	Об'єм бетону, м ³	Проектний клас бетону
1	Буро-залівна паля опори мосту (1 шт.)	50	C25/30
2	Буро-залівна паля опори мосту (2 шт.)	104	C25/30
3	Буро-залівна паля опори мосту (1 шт.)	55	C25/30
Всього		209	



Бетонні суміші готувалися в змішувачах примусової дії.

Дозування матеріалів виконувалося з точністю для цементу, води, добавок до 1%, для заповнювачів – з точністю до 2%. Рухомість бетонної суміші складала 25...27 см, що відповідає марці за осадкою конуса S5 згідно ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Розплив суміші складав 570...610 мм (марка F5 за ДСТУ Б В.2.7-176:2008 та клас SF1 за EN 12350-8).

Склад запропонованої самоущільнюваної бетонної суміші наведено у табл. 5.15.

Таблиця 5.15

Склад самоущільнюваної бетонної суміші

№	Компоненти	Витрата, кг/м ³
1	Цемент ПЦ І-500	410
2	Вода	160
3	Щебінь фракції 2-5 мм	405
4	Щебінь фракції 5-10 мм	665
5	Доменний шлак мелений	160
6	Пісок	600
7	Суперпластифікатор Melflux 2651 F	4,1

Поряд із виготовленням конструктивних елементів, вказаних в табл. 5.14, були заформовані зразки-куби з розміром ребра 10 см для визначення нормативних показників якості бетону. Випробування проводилися в Науково-дослідній лабораторії будівельних матеріалів і виробів (свідоцтво про атестацію № РТ-038/2019 від 27.08.2019 р.).

Результати випробувань, наведені в табл. 5.16.

Таблиця 5.16

Результати випробувань запропонованих складів самоущільнюваних бетонних та фібробетонних сумішей

№ серій зразків	Міцність, при стиску у віці 1 доба, МПа	Показники бетону у віці 28 днів	
		Середня густина, кг/м ³	Міцність, при стиску, МПа
1	24,2	2390	54,1
2	22,4	2375	48,8
3	22,6	2385	53,3



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Отримані результати свідчать про те, що фактичні значення розпливу самоущільнюваних бетонних сумішей а також міцності бетону, повністю відповідає технологічним вимогам. За результатами випробувань ППФ «Торгбудсервіс» та ТОВ «Семікс бетон» прийняли запропоновані рецептури самоущільнюваних бетонів та фібробетонів для впровадження у виробництво.



Національний університет
водного господарства
та природокористування



ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу літературних джерел за темою дослідження встановлено, що оптимальне поєднання ефективних суперпластифікаторів і високодисперсних кремнеземовмісних матеріалів техногенного походження, а при необхідності поєднання з ними інших органічних і мінеральних матеріалів, дозволяє спрямовано керувати реологічними властивостями бетонних сумішей, модифікувати структуру і властивості самоущільнюваних бетонів.
2. Показано, що значний вплив на властивості сумішей і бетонів може чинити проблема сумісності застосовуваних в складі СУБ модифікаторів між собою і з портландцементом. Крім того, вартість основних добавок -суперпластифікаторов на основі полікарбоксилатних ефірів, а також мікрокремнезему, залишається досить високою. Це обумовлює необхідність пошуку рішень по розробці складів поліфункціональних модифікаторів, основу яких складають різні відходи промисловості, які забезпечують отримання бетонних сумішей і бетонів з нормованими показниками якості.
3. Відзначено, що широкому впровадженню мікрокремнезему в складах самоущільнюваних бетонів перешкоджають обмежена технологічність добавки в зв'язку з її низькою насипною густиною, а також висока вартість, що обумовлює необхідність пошуку найбільш ефективних композицій мінеральних добавок, в яких частина або весь мікрокремнезем замінюється іншими, більш доступними матеріалами.
4. Обґрунтовано оптимальні технологічні параметри використання золи-виносу Ладиженської ТЕС різної дисперсності при виготовленні бетонів з покращеними будівельно-технічними властивостями із самоущільнюваних бетонних сумішей. Отримано комплекс експериментально-статистичних моделей, що характеризують діаметр розпливу стандартного конуса, витрату добавки суперпластифікатора Melflux 2651f необхідної для отримання високорухомої самоущільнюваної суміші класів SF1 та SF2, а також



параметрів, що визначають однорідність і стійкість бетонних сумішей до розшарування: водовідділення, розчиновідділення та ефективна в'язкість.

5. Проведені дослідження міцнісних властивостей самоущільнюваних цементно-зольних бетонів. Встановлено, що при постійному В/Ц і витраті золи вплив її дисперсності на міцність самоущільнюваного бетону носить екстремальний характер. На відміну від оптимального значення витрати золи її оптимальна дисперсність залежить від витрати води і частки піску в суміші заповнювачів. Оптимальна дисперсність золи знаходиться в інтервалі значень $S_{з\text{ опт.}}=3500\text{...}4000\text{ см}^2/\text{г}$.

6. Отримані експериментальні і розрахункові дані свідчать про можливість за рахунок введення оптимальної кількості золи-виносу в склади самоущільнюваних бетонів скоротити витрату цементу на 20...23% при одночасному забезпеченні заданої міцності та легкоукладальності.

7. Вивчено комплекс властивостей СУБ, що характеризують їх довговічність, зокрема тріщиностійкість, водонепроникність та морозостійкість. Встановлено, що добавка золи, незважаючи на незначне скорочення загальної кількості відкритих капілярних пор, призводить до підвищення водонепроникності та морозостійкості СУБ з полікарбоксилатним СП, що є результатом зменшення розміру пор. Оптимальним є домел золи до питомої поверхні $3900\text{...}4000\text{ см}^2/\text{г}$.

8. Досліджено композиційні малоцементні самоущільнювані бетони, що містять комплексний золо-метакаоліновий наповнювач. Отримані та проаналізовані експериментально-статистичні моделі розпливу конуса, водовідділення та розшарування бетонної суміші. Показано, що для бетонних сумішей, наповнених ЗМКН, можна досягти в певній області складів практично незначних величин водо- і розчиновідділення.

9. Експериментально встановлено ефективність золо-метакаолінового наповнювача в СУБ у порівнянні з наповненням лише золою. ЗМКН за інших рівних умов сприяє збільшенню рухомості суміші а також збільшенню міцності бетону, особливо в ранні строки твердіння на 10...15%. Для



СУБ з золо-метакаоліновим наповнювачем характерними також кращі параметри порової структури, що в свою чергу позначається на дещо вищих значеннях морозостійкості.

10. Встановлено можливість модифікування самоущільнюваних дрібнозернистих бетонів полімерними добавками. Поліфункціональні модифікатори, що включають полікарбоксилатний суперпластифікатор Melflux 2651f і полівінілацетатну дисперсію (ПВАД) – ПФМ1 або сополімер полівінілацетата (ПВАВ) – ПФМ2 дозволяють зменшити водопотребу цементних і цементно-зольних паст на 13...19%.

11. Відзначено, що добавки ПФМ модифікують структуру цементного і цементно-зольного каменю, змінюючи параметри його порової структури, викликаючи збільшення об'єму закритих пор, зменшуючи середній розмір пор і збільшуючи їх однорідність.

Отримані експериментально-статистичні моделі водопотреби водовідділення та повітрявтягування СУБ з добавками ПФМ в залежності від параметрів складу. При дозуванні СП до 1% водовідділення самоущільнюваних сумішей практично не збільшується, а потім має тенденцію до росту. Полівінілацетатна добавка в складі ПФМ забезпечує зниження водовідділення на всьому інтервалі її вмісту – до 3%. Введення ПФМ забезпечує стабільний повітрявміст самоущільнюваних бетонних сумішей і сприяє збереженню їх рухомості в часі.

12. Для бетонів із добавками ПФМ збільшення В/Ц веде до значно більш істотного падіння міцності при стиску ніж міцності на згин. В міру збільшення як загального вмісту ПФМ, так і частки полімерних компонентів у самоущільнюваних бетонах зменшується співвідношення міцностей на стиск і згин, що особливо проявляється в більш пізні строки твердіння. Зі зміною міцнісних показників бетонів добре корелює і зміна їх водопоглинання. Введення добавок ПВАД і ПВАВ у складі поліфункціональних модифікаторів істотно знижує стираність бетонів.

У СУБ із добавками ПФМ при збільшенні золо-цементного відношення (З/Ц) до 0.4 водопотреба зростає незначно, при $З/Ц > 0.4$ вона змінюється істотно, особливо зі



зменшенням В/Ц. Значення критичного В/Ц, яке обмежує область сталості водопотреби в золо-цементних СУБ, зміщується в бік менших значень при підвищеному вмісті ПФМ.

13. Вплив золо-цементного відношення на міцність при стиску і згині СУБ із добавками ПФМ є екстремальним. Найбільший приріст міцності при стиску і згині СУБ із добавками ПФМ характерний при $Z/C=0.25...0.55$. Введення ПФМ практично не впливає на величину оптимального Z/C .

14. Введення добавок ПФМ істотно впливає на технічні властивості СУБ. Добавки ПФМ зменшують усадочні деформації бетонів на 30...50%. Із збільшенням Z/C до 0.4 водопоглинання СУБ зростає незначно, потім різко збільшується, особливо зі зменшенням частки суперпластифікатора у складі ПФМ. При оптимальних значеннях Z/C , вмісті і складі ПФМ істотно підвищується водонепроникність СУБ.

Введення в СУБ навіть оптимальної з позицій міцності кількості золи-винос призводить до збільшення стираності. Вже 1% ПФМ знижує стираність бетонів більш ніж у 1.5 рази, а 3% – більш ніж у 3. Збільшення частки полівінілацетатного компонента в складі ПФМ збільшує опір стиранню СУБ.

15. Розглянуті технологічні особливості виготовлення самоущільнюваних бетонів. Відзначені основні вимоги до самоущільнюваних бетонних сумішей за реологічними характеристиками. Вказані загальні принципи підбору складу СУБ та приготування суміші. Запропоновано методику розрахунку номінального складу самоущільнюваного бетону.



Перелік літератури

1. A contribution to the explanation of the action principles of organic plasticizers / T. Sebök, J. Krejčí, A. Musil, J. Šimoník. *Cem. Concr. Res.* 2005. Vol. 35, No 8. P. 1551–1554.
2. A New Admixture for High Performance Concrete / M. Tanaka, S. Matsuo, A. Ohta, M. Veda. *Concrete in the Service of Mankind: International Cong.* Dundee (Scotland). 1996. P. 291–300.
3. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals / K. Yoshioka, E. Tazawa, K. Kawai, T. Enohata. *Cem. Concr. Res.* 2002. Vol. 32, No 10. P. 1507–1513.
4. Ahmed S. A. R. Review article on Self-Compacting Concrete. Civil Engineering Department, Faculty of Engineering Altahadi University, 2003. 52 p.
5. Aiad I. Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research.* 2003. Vol. 33, No 8. P. 1229–1234.
6. Alonso M., Palacios M., Puertas F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. *Cement and Concrete Composites.* 2013. Vol. 35. P. 151–162.
7. Application of a New Superplasticizer for Ultra High-Strength Concrete / K. Mitsui, T. Yonezawa, M. Kinoshita, T. Shimono. *The IV CANMET/ACI International Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete: ACI SP-148-2*, 1994: Proc. Detroit (USA), 1994. P. 27–37.
8. Artelt C., Garcia E. Impact of superplasticizer concentration and ultra-fine particles on the rheological behaviour of dense mortar suspensions. *Cement and Concrete Research.* 2008. Vol. 38, No 5. P. 633–642.
9. Brocard M. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics. 1960. Vol. 13, N. 156. P. 1355–1418.
10. Brocard, M. J. Etude de L'Incorporation D' Emulsion de Resinés Synthétiques dans les Mortiers et Betons. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.* 1960, 13(156). P. 1357–1371.



11. Bugayevskiy S., Voronova Ye., Shtefan O. Use of self-compacting concrete during reconstruction of the building for the administration service Centre. *Автомобильный транспорт*. 2016. No. 39. P. 21–27.
12. Collepardi M. A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC). *ACI Intern. Symp. on Sustainable Development and Concrete Technology*. S. Francisco: 16–19 September 2001. P. 23–28.
13. Corinaldesi V., Monosi S., Ruello M. Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 30. P. 289–293.
14. Damtoft J. S., Herfort D., Yde E. Concrete binders, mineral additions and chemical admixtures: state of the art and challenges for the 21st century. *Creating with Concrete : The International Conf. Proc. Dundee (Scotland)*, 1999. P. 1–15.
15. Edward G., Nawy P. Fundamentals of High – Performance Concrete. Willy, 2001. 151 p.
16. Flatt R. J., Martys N. S., Bergström L. The rheology of cementitious materials. *MRS Bulletin*. 2004. Vol. 29, No 5. P. 314–318.
17. Grabiec A.M., Piasta Z. Study on compatibility of cement-superplasticiser assisted by multicriteria statistical optimization. *J. of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 152. P. 197–203.
18. Hanehara S., Yamada K. Rheology and early age properties of cement systems. *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38, No 1. P. 175–195.
19. Idorn Y.M. Hydration of portland-cement paste at high temperature under atmospheric pressure. *The 5th International Symposium on the chemistry of cement*. Tokyo, 1968. P. 411–435.
20. Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures. / I. Papayianny, G. Tsohos, N. Oikonomou, P. Mavria. *Cement and Concrete Composites*. 2005. Vol. 27. P. 217–222.



21. Kong H. J., Bike S. G., Li V. C. Effects of a strong polyelectrolyte on the rheological properties of concentrated cementitious suspensions. *Cem. Concr. Res.* 2006. Vol. 36, No 5. P. 851–857.
22. Łazniewska-Piekarczyk, B. The influence of selected new generation admixtures on the workability, air-voids parameters and frost-resistance of self compacting concrete. *Construction and Building Materials.* 2012. Vol. 31. P. 310–319.
23. Litvan Y. Y. Qir entrainment in the presence of superplasticizers. *ACI.* 1983. No 4. P. 326–331.
24. Liu M. Wider Application of Additions in Self-compacting Concrete. *A thesis submitted to University College London for the degree of Doctor of Philosophy:* Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering University College London. 2009. 392 p.
25. Massazza F., Costa U., Barrila A. Qdsortion of superplasticizers on calcium aluminate monosulfate hydrate. *Developments in the use of superplasticizers. SP-68. ACI.* 1981. P. 499–514.
26. Mbele J.-J. Optimization of Self-Consolidating Concrete for Slip-form pavement. *A thesis submitted in partial fulfillment for the degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering:* Northwestern University. April 2006. 83 p.
27. McCathy G. I., Solem I. K., Manz O. E., Hassett D. I. Use of a Database of Chemical Mineralogical and Physical Properties of North American Fly Ash to Study the Nature of Fly Ash and its Utilization as a Mineral Admixture in Concrete. *Material Research Society* : Proc. MRS Symposium. Pittsburg, 1999. V. 178. P. 3–33.
28. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles / M. Jalal, E. Mansouri, M. Sharifipour, A.R. Pouladkhan. *Materials and Design.* 2012. Vol. 34. P. 389–400.
29. Mechanism of Actions of Different Superplasticizers for High-Performance Concrete / S. Colleparidi, L. Coppola, R. Troli, M. Colleparidi. *High-Performance Concrete. Performance and*



- Quality of Concrete Structures* : Atti del Second CANMET/ACI International Conf. 1999: Proc. Gramado (Brazil), 1999. P. 503–523.
30. Mehmet, G., Erhan G., Erdogan O. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. P. 1847–1854.
 31. Merlin, F., Guitouni H. et al. Adsorption and heterocoagulation of nonionic surfactants and latex particles on cement hydrates. *J. of Colloid and Interface Science*. 2005. Vol. 281. P. 1–10.
 32. Namiki M., Ohama Y. *Plastics concrete in Japanese*. Kyoto: Kobunshi – Kankokai. 1965. 210 p.
 33. Nasim A. S. M., Singh D. N. Fly ash classification on the basis of chemical composition. *II Proc. Intern. Symposium of Ash Utilisation*. Lexington, Kentucky. 1997. P. 745–752.
 34. Nawa T., Eguchi H., Fukaya Y. Effect of Alkali Sulfate on the Rheological Behavior of Cement Paste Containing a Superplasticizer. *The Third International Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*. 1989: Proc. Ottawa (Canada), 1989. P. 405–424.
 35. Nepomuceno M., Oliveira L., Lopes S.M.R. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 26, P. 317–326.
 36. *New Generation Cement Concretes. Ideas, Design, Technology and Applications 2* / R. Hela, L. Bodnarova et al. LLP-Erasmus: 8203-0519/IP/Kosice 03/REN: Brno University of Technology, 2009. 174 p.
 37. Ohama Y. Development of concrete – polymer materials in Japan. *Proceedings of the Second international congress on polymers in concrete*. Austin. 1978 P. 128–135.
 38. Ohta A., Sugiyama T., Tanaka Y. Fluidizing Mechanism and Applications of Polycarboxylate-Based Superplasticizers. *The Fifth CANMET/ACI International Conf.*, SP-173, 1997: Proc. Rome (Italy). 1997. P. 359–378.



39. Okamura H., Ozawa K. Mix Design for Self-Compacting Concrete. *Concrete Library of JSCE*. 1995. No. 25. P. 107–120.
40. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting high performance concrete. *Concrete International*. 1997. Vol. 19, No 7. P. 50–54.
41. Phan T.H., Chaouche M., Moranville M. Influence of organic admixtures on the rheological behavior of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36, No 10. P. 1807–1813.
42. Properties of self-compacting concrete with slag fine aggregates / Shoya M., Sugita S., Tsukinaga Y., Aba M., Tokuhasi K. *Creating with Concrete : Proceedings of the Intern. Conf. Dundee*. 1999. P. 121–130.
43. Pushkarova K., Domoslawsky W. Features of Processes Hydration and Hardening of Binding Compositions Based on Fluidized fly ash. *Proc. of Seventh NCB International Seminar on Cement and Building Materials*. New Delhi, India. 2000. P. 125–134.
44. Recent developments of special self-compacting concretes / M. Collepardi, A. Borsoi, S. Collepardi, R. Troli. *Sevenths CANMET/ACI Intern. Conf. on Recent Advances in Concrete Technology*. Sp 222-1. P. 1–17.
45. Rivera-Villarreal R. Concrete superplasticizers admixtures. *Creating with Concrete : International Conf. 1999: Proc. Dundee (Scotland)*. 1999. P. 391–407.
46. S. Lea's. *Chemistry of cement and concrete*, ed. by Peter C. Hewlett. 1998. 1008 c.
47. Sahmaran M., Christianto H., Yaman I. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement and Concrete Composites*. 2006. Vol. 28. P. 432–440.
48. Sanytsky M., Marushchak U., Olevych Y., Novytskyi Y. Nano-modified ultra-rapid hardening Portland Cement compositions for high strength concretes. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. P. 392–399.



49. Self Consolidation Concrete: A White Paper by Researches at the Center of Advanced Cement Based Materials (ACBM). D.A. Lange [Ed.]. February, 2007. 42 p.
50. Siddique R., Aggarwal P. Aggarwal Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials*. Vol. 29. 2012. P. 73–81.
51. Su N., Hsu K-C., Chai H-W. A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cem. Concr. Res.* Vol. 31. 2001. P. 1799–1807.
52. Swamy R. Design for durability and strength through the use of fly ash and slag in concrete. *Advances in Concrete Science and Technology* : Proc. Mario Collepardi Symposium. Rome, Italy. 1997. P. 127–194.
53. The adsorption behaviour of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste / B. Kim, S. Jiang, C. Jolicoeur, P.-C. Aitcin. *Cem. Concr. Res.* 2000. Vol. 30, No 6. P. 887–893.
54. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use. SCC European Project Group, May 2005. 63 pp.
55. Torresan, I., Magarotto R., Zeminian N. Interaction between Superplasticizers and Limestone Blended Cements. *The Sixth CANMET/ACI International Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*. SP-195, 2000: Proc. Nice (France). 2000. P. 229–247.
56. Wallevik O. H. Rheology – a scientific approach to develop Self compacting concrete. In: *The 3rd Intern. Symp. on Self-compacting Concrete*. RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France. 2003. P. 23–31.
57. Zhang M-H., Islam J., Peethamparan S. Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. *Cement and Concrete Composites*. 2012. Vol. 34. P. 650–662.
58. Адсорбция органических веществ из воды / А. М. Когановский, Н. А. Клименко, Т. М. Шевченко, И. Г. Рода. Л. : Химия, 1990. 256 с.



59. Афанасьев, Н. Ф., Целуйко, М. К. Добавки в бетоны и растворы. К. : Будивэльник, 1989. 128 с.
60. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. М. : Стройиздат, 1981. 464 с.
61. Бабачев Г. Н. Золы и шлаки в производстве строительных материалов / пер. с болт. Шарина Л. К. : Будівельник, 1997. 36 с.
62. Баженов Ю. М. Бетнополимеры. М. : Стройиздат, 1983. 472 с.
63. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : Высшая школа, 1987. 415 с.
64. Баженов Ю. М., Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы. *Строительные материалы*. 2014. Т. 3 (711). С. 6–14.
65. Баженов Ю. М. Современная технология бетона. *Технологии бетонов*. 2005. № 6. С. 6–8.
66. Базанов С. М., Торопова М. В. Самоуплотняющийся бетон – эффективный инструмент в решении задач строительства. Ивановская госуд. академия строит-ва и арх-ры. URL: <http://subscribe.ru/archive/home.build.penobeton/200703/13103620.html>. (дата звернення: 20.12.2020).
67. Барабанщиков Ю. Г., Архарова А. А., Терновский М. В. Бетон с пониженной усадкой и ползучестью. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 7(22). С. 152–165.
68. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. М. : Стройиздат, 1990. 400 с.
69. Батраков В. Г., Каприелов С. С., Шейнфельд А. В. Эффективность применения ультрадисперсных отходов ферросплавного производства. *Бетон и железобетон*. 1989. № 8. С. 24–25.
70. Батраков В. Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы. *Строительные материалы*. 2006. № 10. С. 4–7.



71. Батудаева А. В., Кардумян Г. С., Каприелов С. С. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей. *Бетон и железобетон*. 2005. № 4. С. 14–18.
72. Боженев П. И. Технология автоклавных материалов. Л. : Стройиздат, 1978. 378 с.
73. Болотских, О. Н. Самоуплотняющийся бетон и его диагностика. *Бетон и железобетон в Украине*. 2007. № 2. С. 2–5.
74. Волженский А. В., Буров Ю. С., Колокольников В. С. Минеральные вяжущие вещества. М. : Стройиздат, 1966. 407 с.
75. Высоцкий С. А. Бетоны на золосодержащих цементах. *Бетоны на новых видах цементов*. М. : НИИЖБ. 1987. С. 17–33.
76. Горчаков Г. И. , Капкин М. М., Скрамтаев Б. Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М. : Стройиздат, 1965. 196 с.
77. Горчаков Г. И., Набоков А. Б., Притула С. Ф. Структура и морозотойкость гидротехнического бетона с добавкой золы-уноса ТЭС. *Материалы конф. и совещ. по гидротехнике*. Л. : Энергия, 1978. Вып. 118. С. 80–85.
78. Грушко И. М., Ильин А. Г., Ражевский С. Т. Прочность бетонов на растяжение. Х-в: Издательство ХГУ, 1973. 155 с.
79. Гук Г. В. Полимерцементный бетон в автомобильном строительстве. Львов : «Свит», 1990. 96 с.
80. Дворкин Л. И., Кизима В. П. Эффективные литые бетоны. Львов : Вища школа, 1986. 144 с.
81. Дворкин Л. И. Снижение расхода цемента и топлива в производстве сборного железобетона. К. : Вища школа, 1985. 98 с.
82. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона. Львов : Вища школа, 1981. 160 с.
83. Дворкин Л. И., Гоц В. И., Дворкин О. Л. Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов. М. : Инфра-Инженерия, 2014. 432 с.



84. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Основы бетоноведения. Санкт-Петербург : ООО «Строй-Бетон», 2006. 690 с.
85. Дворкин Л. И., Лихтман М. А. Влияние содержания золы и ее дисперсности на вязкость и подвижность цементно-золыного теста. *Строительные материалы и конструкции*. 1989. № 3. С. 35–36.
86. Дворкин Л. И., Лушникова Н. В. Высокопрочные бетоны на основе литых бетонных смесей с использованием полифункционального модификатора, содержащего метакаолин. *Бетон и железобетон*. 2007. № 1. С. 2–7.
87. Дворкин Л. И., Пресман И. Г. Использование золы-уноса ТЭС для приготовления бетонов и растворов при строительстве ЭС. М. : Информэнерго. 52 с.
88. Десов А. Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформации бетонов. *Структура, прочность и деформация бетонов*. М. : Стройиздат, 1966. С. 4–59.
89. Добавки в бетон / Рамачандран В. С., Фельдман Р. Ф., Коллепарди М. и др. ; под ред. В. С. Рамачандрана. М. : Стройиздат, 1988. 575 с.
90. Електричні впливи на бетон (електрообробка та захист від електрокорозії бетонів, виробів і конструкцій із них) : монографія / за ред. А. А. Плугіна і М. М. Зайченка. Харків : Форт, 2013. 300 с.
91. Зайченко Н. М. Високоміцні тонкозернисті бетони з комплексно модифікованою мікроструктурою : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05. Макіївка : ДонНАБА, 2009. 356 с.
92. Зоткин А. Г., Балтаков Р. Ф. Назначение составов бетона с золой. *Бетон и железобетон*. 1988. № 1. С. 31–33.
93. Иванов Ф. М. Эффективность использования суперпластификаторов. *Бетоны с эффективными модифицирующими добавками* : сб. науч. тр. / под ред. Ф. М. Иванова, В. Г. Батракова. М. : НИИЖБ, 1985. С. 3–7.
94. Идорн Г. М., Фердеш З. Ф. Цементно-полимерные материалы. *Шестой международный конкурс по химии цементов*. Т. III. М. : Стройиздат, 1976.



95. Изотов В. С., Ибрагимов Р. А. Особенности процесса гидратации цемента с комплексной добавкой. *Известия КГАСУ*. 2010. № 2 (14). С. 229–233.
96. Калашников В. И. Проблемы использования высокопрочного и особовысокопрочного бетона и основные принципы их создания. *Технологии бетонов*. 2009. № 2. С. 8–10.
97. Каприелов С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива. *Бетон и железобетон*. 1999. № 6. С. 6–10.
98. Каприелов С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов. *Бетон железобетон*. 1995. № 4. С. 16–20.
99. Кашапов Р. Р., Красиникова Н. М., Морозов Н. М., Хозин В. Г. Влияние комплексной добавки на твердение цементного камня. *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 27–30.
100. Кокубу М., Ямада Д. Цементы с добавкой золы. *Шестой международный конгресс по химии цемента*. М. : Стройиздат, 1976. Т. 3. С. 83–94.
101. Комаринский М. В., Смирнов С. И., Бурцева Д. Е. Литые и самоуплотняющиеся бетонные смеси. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. Вып. 11(38). С. 106–118.
102. Комохов П. Г., Солнцева В. А., Петрова Т. М. Влияние полимерных добавок на формирование структуры бетона. *Вопросы применения полимерных материалов в строительстве*. Саранск, 1976. С. 91–97.
103. Комохов, П. Г. Наукоемкая технология конструкционного бетона как композиционного материала. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2002. Часть 1. № 4. С. 36–37.
104. Комохов, П. Г. Наукоемкая технология конструкционного бетона как композиционного материала. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2002. Часть 2. № 5. С. 26–27.



105. Композиционное вяжущее для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов / А. К. Дятлов, А. И. Харченко, М. И. Баженов, И. Я. Харченко. *Технологии бетонов*. 2013. № 3. С. 40–43.
106. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, А. В. Сиренко. К. : Будивзельник, 1991. 144 с.
107. Круглицкий Н. Н., Бойко Г. П. Физико-химическая механика цементно-полимерных композиций. Киев : «Наукова думка», 1981. 240 с.
108. Круглицкий Н.Н., Васнер Г.Р., Прийма Е.И., Кулин И.А. Способы модификации микронаполнителей. *Строительные материалы и конструкции*. 1981. №4. С. 27-33.
109. Круглицкий Н. Н., Гранковский И. Г., Бойко Г. П. Кинетика начальных стадий структурообразования и прочность цементов с малыми добавками полимеров. *Хим. технология*. 1971. № 6. С. 29–33.
110. Кузнецова Т. В., Нефедьев А. П., Коссов Д. Ю. Кинетика гидратации и свойства цемента с добавкой метакаолина. *Строительные материалы*. 2015. № 7. С. 3–9.
111. Кузнецова Е. Ф. Эффективные литые бетоны с использованием отходов камнеобработки : дисс... канд. техн. наук : 05.23.05. Кострома : ФГБОУ ВПО КГСА, 2014. 149 с.
112. Лещинский М. Ю. Влияние золы-уноса на свойства бетона. *Строительные материалы*. 1986. № 2. С. 18.
113. Лещинский М. Ю. О применении золы-уноса в бетонах. *Бетон и железобетон*. 1987. № 1. С. 19–21.
114. Лотов В. А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий. *Строительные материалы*. 2006. № 8. С. 5–7.
115. Любимова Т. Ю., Пинус Э. Р. Процессы кристаллизационного структурообразования в зоне контакта между заполнителем и вяжущим в цементном камне. *Коллоидный журнал*. 1962. № 5. Т. XXIV. С. 15–20.



116. Малинина Л. А. Проблемы производства и применения ТМЦ. *Бетон и железобетон*. 1990. № 2. С. 3–5.
117. Массачца А. Химия пуццолановых добавок и смешанных цементов. *6-й Международный конгресс по химии цемента*. М. : Стройиздат, 1976. Т. 3. С. 209–211.
118. Метакраолін в будівельних розчинах і бетонах: монографія / Дворкін Л. Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В. К. : КНУБіА, 2007. 216 с.
119. Минаков С. В. Влияние электроповерхностных свойств минеральных добавок на эффективность разжижителей цементных систем : дисс... канд. техн. наук : 05.23.05. Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. 131 с.
120. Мозгалев К. М. Эффективность применения самоуплотняющихся бетонов при возведении монолитных зданий в зимних условиях. *Технология и организация строительного производства*. 2014. № 1. С. 33–37.
121. Мозгалев К. М., Мозгалев К. М. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства. *Академический вестник Урал-НИИпроект РААСН*. 2011. С. 70–74.
122. Наполнители для полимерных композиционных материалов : справ. Пособие / под ред. П. Г. Бабаевского. М. : Химия, 1981. 736 с.
123. Невилль А. М. Свойства бетона. М. : Стройиздат, 1972. 344 с.
124. Несветаев Г. В. Некоторые вопросы применения добавок для бетонов. *Бетон и железобетон*. 2011. № 2. С. 78–80.
125. Несветаев Г. В., Лопатина Ю. Ю. Проектирование макроструктуры самоуплотняющейся бетонной смеси и ее растворной составляющей. *Науковедение*. No 5(30). Т. 7. 2015.
126. Николаенко Н. В. Специфическая адсорбция полярных органических соединений из водных растворов на межфазной границе дисперсных систем твердое тело-жидкость : дис. ... д-ра. хим. наук : 02.00.11. Днепропетровск, 2003. 343 с.



127. О гидратации и твердении цементов с золой / Энтин З. Б., Яшина Е. Т., Лепешникова Г. Г., Рязанцева Н. З. *Тр. VI между нар. конгр. по химии цементов*. М.: Стройиздат, 1976. Т. 3. С. 95–99.
128. Ольгинский А. Г. Процессы гидратации портландцемента с минеральной пылью различного состава. *Строительство: изв. ВУЗов*. 1991. № 12. С. 50–53.
129. Пантелеев А. С., Колбасов В. Н. Цементы с минеральными добавками – микронаполнителями. *Новое в химии и технологии цемента*. М.: Стройиздат, 1971. С. 155–164.
130. Перспективы использования ПППФ в технологии сборного железобетона / Мчедлов-Петросн О. П., Ушеров-Маршак А. В., Москаленко С. Б. и др. *Бетон и железобетон*. 1986. № 9. С. 32–33.
131. Попова О. С. Коррозионная стойкость бетонов с добавками водорастворимых смол. *Бетон и железобетон*. 1983. № 8. С. 17–19.
132. Практическое бетоноведение / Дворкин Л. И., Дворкин О. Л., Бордюженко О. М. и др. URL: <http://subscribe.ru/archive/home.build.penobeton/200808/25211157.html>. (дата звернення: 05.10.2020).
133. Предтеченский М. В. Влияние кремнеземной пыли на формирование свойств высокопрочных бетонов. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2001. № 11. С. 8–9.
134. Проектирование самоуплотняющихся бетонов / Д. М. Поляков, С. В. Коваль, М. Ситарски, М. Циак. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2008. № 31. С. 287–294.
135. Ратинов Б. В., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 186 с.
136. Рекомендации по применению бетонов и растворов с добавками полимеров. М.: Стройиздат, 1968. 24 с.
137. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. М.: НИИЖБ. 1982. 103 с.



138. Саницький М. А., Марущак У. Д., Кіракевич І. І., Стечишин М. С. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсно-армованих цементуючих систем. *Будівельні матеріали і виробі.* 2015. № 1. С. 10–14.
139. Саталкин А. В., Солнцева В. А., Панова О. С. Цементно-полимерные бетоны. М. : Стройиздат, 1971. 169 с.
140. Сегалова Е. Е., Ребиндер П. А. Современные физико-химические представления о процессах твердения минеральных вяжущих веществ. *Строительные материалы.* 1960. № 1. С. 21–26.
141. Сергеев А. М. Использование в строительстве отходов энергетической промышленности. К. : Будівельник, 1984. 120 с.
142. Скунин Л. Полимерные растворы и пластбетоны. М. : Стройиздат, 1967. 175 с.
143. Соломатов В. И. Полимерцементные бетоны и пластбетоны. М. : Стройиздат, 1967. 184 с.
144. Соломатов В. И., Дворкин Л. И., Чудновский С. М. Пути активизации наполнителей композиционных строительных материалов. *Стр-во и архитектура* : изв. ВУЗов. 1987. № 1. С. 60–63.
145. Соломатов В. И., Сецев В. П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. М. : Стройиздат, 1987. 264 с.
146. Соломатов В. И., Тахиров М. К., Тахер Шах. Интенсивная технология бетонов. М. : Стройиздат, 1989. 264 с.
147. Соломатов В. И., Тахиров М. К., Коротин М. М. Бетон с АЦФ – добавкой для транспортного строительства. М. : Транспорт, 1986. 63 с.
148. Соломатов В. И., Кононова О. В. Особенности формирования свойств цементных композиций при различной дисперсности цементов и наполнителей. *Строительство и архитектура* : изв. ВУЗов. 1991. № 5. С. 42–45.
149. Стечишин М. С., Саницький М. А., Позняк О. Р., Бігун Г. Г. Фіброармовані самоущільнювальні бетони з високим вмістом золи винесення. *Вісник Національного*



- університету «Львівська політехніка». *Теорія і практика будівництва*. 2015. № 823. С. 308–314.
150. Стольников В. В. Исследования по гидротехническому бетону. М. : Госэнергоиздат, 1962. 330 с.
 151. Стольников В. В., Литвинова Р. Е. Трещиностойкость бетона. М. : Энергия, 1972. 113 с.
 152. Стольников В. В., Кинд В. В. Гидротехнический бетон с добавкой топливной золы-уноса. Л. : Госэнергоиздат, 1963. 124 с.
 153. Та Ван Фан. Самоуплотняющиеся высокопрочные бетоны с золой рисовой шелухи и метакаолином : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Ростов-на-Дону : ФБГОУ ВПО «РГСУ», 2013. 184 с.
 154. Тейлор Х. Химия цемента / пер. с англ. М. : Мир, 1996. 560 с.
 155. Удачкин И. Б., Коваленко О. Н. Вяжущие низкой водопотребности. *Строительные материалы и конструкции*. 1991. № 2. С. 10–13.
 156. Урьев Н. Б. Михайлов Н. В. Коллоидный цементный клей и его применение в строительстве. М. : Стройиздат, 1967. 175 с.
 157. Ушеров-Маршак А. В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы. *Строительные материалы*. 2006. № 10. С. 8–12.
 158. Ушеров-Маршак А. В. Современный бетон и его технологии. *Бетон и железобетон*. 2009. Вып. 2. С. 20–25.
 159. Ушеров-Маршак А. В. Украинский бетон по пути в Европу. *Дни современного бетона : VI междунар. науч.-практ. конф., 7-9 июня, 2004 г. : сб. докл.* Запорожье : ООО «Будиндустрия ЛТД», 2004. С. 14–22.
 160. Халюшев А. К., Зайченко Н. М., Поливцев С. С. Оптимизация состава композиционных цементов с минеральными добавками на основе отходов промышленности. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2008. Вип. 16. Ч. 1. С. 103–110.
 161. Хигерович М. И., Никитин Н. В. Замена извести в строительных растворах гидрофобизирующим карбонатным пластификатором. *Цемент*. 1958. № 5. С. 25–34.



162. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Дворкин Л. И., Соломатов В. И., Выровой В. Н., Чудновский С. М. ; под ред. Л. И. Дворкина. К. : Будівельник, 1991. 136 с.
163. Черкинский Ю. С. Полимерцементный бетон. М. : Стройиздат, 1960. 148 с.
164. Черкинский Ю. С., Калашников В. М. Некоторые реологические свойства полимерцементной суспензии. *Сб.тр. ВНИИНСМ*. 1961. Вып. 2. С. 41–44.
165. Черкинский Ю. С., Слипченко Г. Ф. Гидратационное твердение цемента в присутствии полимеров. *Шестой международный конгресс по химии цемента*. М. : Стройиздат, 1976. Т. 3. С. 305–307.
166. Чеховский К. В. Понижение проницаемости бетона. М. : Энергия, 1968. 192 с.
167. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М. : Стройиздат, 1979. 344 с.
168. Шейнич Л. А., Попруга П. В. Высокопрочные бетоны для монолитного домостроения. *Будівельні конструкції* : зб. наук. праць. К. : НДІБК, 2007. Вип. 32. С. 311–314.
169. Шульце В., Титер В., Эттель В. П. Растворы и бетоны на цементных вяжущих. М. : Стройиздат, 1990. 240 с.
170. Якупов М. И., Морозов Н. М., Боровских И. В., Хозин В. Г. Модифицированный мелкозернистый бетон для возведения монолитных покрытий взлетно-посадочных полос аэродромов. *Известия КГАСУ*. 2013. № 4 (26). С. 257–261.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Наукове видання

*Дворкін Леонід Йосипович
Бордюженко Олег Михайлович*

ЕФЕКТИВНІ САМОУЩІЛЬНЮВАНІ БЕТОНИ



Монографія

Технічний редактор

Г.Ф. Сімчук

Підписано до друку 15.02.2021 р. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Ум.-друк. арк. 9,9. Обл.-вид. арк. 10,3.
Тираж 300 прим. Зам. № 5526.

*Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*