

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО- НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Промислове та цивільне будівництво
(повна назва)

Кваліфікаційна робота

рівень вищої освіти Магістр
(рівень вищої освіти)

на тему: **Аналіз можливостей використання властивостей бетонів на активованій в'язучій речовині для ремонтно-відновлювальних робіт**

Виконав: студент 2 курсу, групи
8.1929- пцб д

Баранов Антон Володимирович
(прізвище та ініціали)

спеціальність
192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

освітньо-професійна програма
промислове і цивільне будівництво
(шифр і назва)

Керівник доцент, к.т.н. Самченко Р
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та іні

Рецензент доц. д.т.н. Срута
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та іні

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра Промислового та цивільного будівництва
Рівень вищої освіти магістерський
Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(код таї назва)
Освітня програма «Промислове і цивільне будівництво»
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Друж

«15» 05 2020

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

Баранов Антон Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз можливостей використання властивостей бетонів на активованій в'язучій речовині для ремонтно-відновлювальних робіт

керівник роботи Самченко Роман Васильович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

загтверджені наказом ЗНУ від «15» 05 2020 року

№ 195-с


2 Строк подання студентом роботи 09.12.2020

3 Вихідні дані до роботи нормативно-технічна документація, в стосовно досвіду вибору технологій та матеріалів м будівництва

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, я розробити) 1. Стан питання і завдання роботи. 2. Аналіз фізико-ластивостей бетону на активованій в'язучій речовині експлуатаційних властивостей бетону на активованій в'язуч

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням деслень) вісім листів

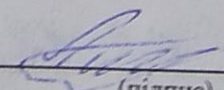
6 Консультанти розділів роботи

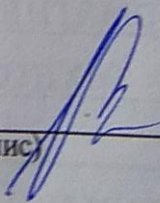
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис завдання видав
Розділ 1	Самченко Р.В.	
Розділ 2	Самченко Р.В.	
Розділ 3	Самченко Р.В.	

7 Дата видачі завдання _____

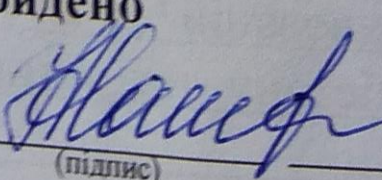
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Стан питання і завдання роботи	з 01.10 по 24.10.2020
2	Аналіз фізико-механічних властивостей бетону на активованій в'язучій речовині	з 25.10 по 15.11.2020
3	Аналіз експлуатаційних властивостей бетону на активованій в'язучій речовині	з 16.11 по 06.12.2020

Студент  (підпис) А.В. Баранов (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер  (підпис) Данкевич Н.О. (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Баранов А.В. Аналіз можливостей використання властивостей бетонів на активованій в'язучій речовині для ремонтно-відновлювальних робіт.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник Р.В. Самченко. Запорізький національний університет, Інженерний інститут. Факультет будівництва і цивільної інженерії, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2020.

Розглянуто стан питання і завдання дослідження, де був проведений аналіз умов експлуатації та ремонту, забезпечення експлуатаційних властивостей елементів транспортних споруд, проаналізовані сучасні методи ресурсозбереження при проведенні ремонтно-відновлювальних роботах.

Виконано аналіз фізико-механічних властивостей бетону на активованій в'язучій речовині, проаналізовано вологісний стан бетону на активованій в'язучій речовині в часі, реологічні властивості бетонних сумішей для відновлення масивних транспортних споруд, вплив гігromетричного стану на власні деформації бетону, взаємозалежність пружної усадки та вологісного стану бетону.

Проведено аналіз експлуатаційних властивостей бетону на активованій в'язучій речовині, проаналізовані експлуатаційні властивості контактного шару нового і старого бетону, замонолічування та гідроізоляція стиків елементів.

Ключові слова: фізико-механічні властивості бетону, активована в'язуча речовина, аналіз, ремонт.

Самченко Р.В., Баранов А.В. Аналіз можливостей використання властивостей бетонів на активованій в'язучій речовині для ремонтно-відновлювальних робіт. *Збірник наукових праць студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів кафедри ПЦБ*. Запоріжжя: ІННІ ЗНУ, 2020.

АННОТАЦИЯ

Баранов А.В. Анализ возможностей использования свойств бетонов на активированной вяжущие речовини для ремонтно-восстановительных работ.

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 192 - Строительство и гражданская инженерия, научный руководитель Р.В. Самченко. Запорожский национальный университет, Инженерный институт. Факультет строительства и гражданской инженерии, кафедра промышленного и гражданского строительства, в 2020.

Рассмотрены состояние вопроса и задачи исследования, где был проведен анализ условий эксплуатации и ремонта, обеспечения эксплуатационных свойств элементов транспортных сооружений, проанализированы современные методы ресурсосбережения при проведении ремонтно-восстановительных работах.

Выполнен анализ физико-механических свойств бетона на активированной вяжущие вещества, проанализированы влажностный состояние бетона на активированной вяжущие вещества во времени, реологические свойства бетонных смесей для восстановления массивных транспортных сооружений, влияние гигрометричного состояния собственными деформации бетона, взаимозависимость упругой усадки и влажностного состояния бетона.

Проведен анализ эксплуатационных свойств бетона на активированной вяжущие вещества, проанализированы эксплуатационные свойства контактного слоя нового и старого бетона, замоноличивания и гидроизоляция стыков элементов.

Ключевые слова: физико-механические свойства бетона, активированный вяжущие речовована, анализ, ремонт.

Самченко Р.В., Баранов А.В. Анализ возможностей использования свойств бетонов на активированной вяжущие речовини для ремонтно-восстановительных работ. Сборник научных работ студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей кафедры ПГС. Запорожье: ИННИ ЗНУ, 2020.

ANNOTATION

Baranov A. Analysis of the possibilities of using the properties of concrete on activated binder for repair and restoration works.

Qualification final work for obtaining a master's degree in the specialty 192 - Construction and Civil Engineering, supervisor RV Samchenko. Zaporizhzhya National University, Institute of Engineering. Faculty of Civil Engineering and Civil Engineering, Department of Industrial and Civil Engineering, 2020.

The state of the issue and the task of the study are considered, where the analysis of operating and repair conditions, ensuring the operational properties of the elements of transport structures, analyzed modern methods of resource conservation during repair and restoration works.

The analysis of physical and mechanical properties of concrete on activated binder is performed, the wet state of concrete on activated binder in time, rheological properties of concrete mixtures for restoration of massive transport structures, influence of hygrometric condition on own deformations of concrete and interdependence are analyzed. condition of concrete.

The analysis of operational properties of concrete on the activated binder, the operational properties of a contact layer of new and old concrete, monolithic and waterproofing of joints of elements are analyzed.

Keywords: physical and mechanical properties of concrete, activated binder, analysis, repair.

Samchenko RV, Baranov AV Analysis of the possibilities of using the properties of concrete on activated binder for repair and restoration works. Collection of scientific works of students, undergraduates, graduate students, young scientists and teachers of the Department of PCB. Zaporozhye: INNI ZNU, 2020.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ РОБОТИ.....	10
1.1 Аналіз умов експлуатації та ремонтуспоруд.....	10
1.2 Забезпечення експлуатаційних властивостей елементів транспортних споруд	15
1.3 Сучасні методи ресурсозбереження при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт на транспортних спорудах.....	19
1.4 Забезпечення зчеплення нового бетону зі старим при відновленні споруд	28
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ НА АКТИВОВАНИЙ В'ЯЖУЧІЙ РЕЧОВИНІ.....	32
2.1 Аналіз вологісного стану бетону на активованій в'язучій речовині в часі	32
2.2 Реологічні властивості бетонних сумішей для відновлення масивних транспортних споруд	48
2.3 Вплив гігromетричного стану на власні деформації бетону транспортних споруд	57
2.4 Взаємозалежність пружної усадки й вологісного стану бетону	61
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ НА АКТИВОВАНИЙ В'ЯЖУЧІЙ РЕЧОВИНІ.....	68
3.1. Експлуатаційні властивості контактного шару нового і старого бетону	68
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79

ВСТУП

Актуальність. Розширення вимог, що висуваються до матеріалів для відновлення експлуатаційних характеристик споруд з урахуванням зростаючих динамічних навантажень на конструкції, призводить до того, що, незважаючи на різноманіття композицій, які застосовуються для ремонтних робіт. З цієї причини виникає необхідність створення бетонів із заданими технологічними, конструкційними й іншими властивостями. Такі завдання не можуть бути вирішені в повному обсязі за рахунок синтезу нових видів модифікаторів, тому що це пов'язано зі значними витратами. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку економічних шляхів оптимізації властивостей бетонів.

Одним з таких шляхів є розробка бетонів з заданими експлуатаційними властивостями з використанням наявних загальнодоступних сполук, модифікаторів, наповнювачів за рахунок оптимізації їх складів.

Метою роботи є розробка бетонів підвищеної стійкості для відновлення несучої здатності штучних транспортних споруд, що забезпечується використанням хімічно активних компонентів цементної системи.

Для досягнення мети були поставлені й вирішені такі **завдання**:

дослідження основних властивостей матеріалів для ремонтно-відновлювальних робіт;

дослідження процесу структуроутворення зі встановленням закономірностей формування структури активованої цементної матриці, що забезпечує задані експлуатаційні властивості бетону;

забезпечення проектного ступеня зчеплення ремонтного бетонного шару з поверхнею конструкцій штучної транспортної споруди, що ремонтується;

дослідження експлуатаційних властивостей бетону на активованій в'язучій речовині.

Об'єкт дослідження — властивості бетонів на активованій в'язучій речовині для ремонтно-відновлювальних робіт на транспортних спорудах.

Предмет дослідження - фізико-хімічні закономірності формування структури бетонів на активованій в'язучій речовині для ремонтно-

відновлювальних робіт.

Наукова новизна. Був проведений аналіз накопиченого досвіду з формування теоретичних основ технології, матеріалознавства та організації ремонтних робіт. Були проаналізовані фізикотехнічні властивості бетонів під дією різних фізичних властивостей, що дало змогу одержання бетонів з високими експлуатаційними властивостями для ремонтно-відновлювальних робіт на транспортних спорудах можливо при використанні активованої в'язучої речовини зі спеціальним органо-мінеральним комплексом поліфункціональної дії.

Практичне значення. Отримані результати дають змогу сформулювати теоретичні засади для подальших досліджень зі створення систем оптимізаційних рішень ремонтних робіт.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ РОБОТИ

1.1 Аналіз умов експлуатації та ремонтуспоруд

Проведення відновлювальних бетонних робіт на різних спорудах вимагає спеціальних досліджень, використання накопиченого досвіду й формування теоретичних основ технології, матеріалознавства й організації ремонтних робіт. В історії становлення цього виду будівництва існує чимало яскравих прикладів як успішного відновлення несучої здатності конструкцій і елементів, зокрема транспортних споруд, так і фактів невдалого проведення ремонтних робіт, які згодом привели до аварій і необхідності повторного відновлення. Таким чином, до проблеми ремонту штучних транспортних споруд потрібно підходити, маючи солідний запас теоретичних і практичних знань, заснованих на дослідженнях у цій області, узагальнюючи досвід вітчизняних і закордонних дослідників. Особливо це питання актуальне в наш час, оскільки всі основні дослідження та роботи були виконані у 50-70 роки ХХ ст. і вимагають перегляду та корегування з урахуванням техніко-економічного фактору, прогнозування й забезпечення довговічності об'єкта, що відновлюється.

При відновленні та ремонті транспортних споруд основна увага приділяється способу нанесення бетонної суміші або цементного розчину, який виключає істотну зміну їхнього складу і забезпечує комплекс заданих властивостей ремонтного шару. Реалізація цього принципу значною мірою досягається належним проектуванням складу бетону і розчину з урахуванням специфічних вимог, які висуваються до таких сумішей: підвищена міцність, висока водонепроникність, однорідність, стійкість в агресивних середовищах, надійне зчеплення нового бетону зі старим, висока зв'язність бетонної суміші при підвищеній рухливості (пластичності), нерозшаровуваність, повільне тужавіння, але швидке тверднення. Основною вимогою до технології ремонту та відновлення несучої здатності елементів транспортних споруд є організація безперервного провадження робіт зі скороченням їхньої тривалості.

З розвитком технічного прогресу висуваються нові вимоги до якості ремонту споруд спеціального призначення, розширюються галузі застосування способів укладання бетону. З'явилися й впроваджуються в Україні й за рубежом прогресивні прийоми при виробництві бетонних робіт, що дозволяють широко механізувати виробничий процес, прискорити ремонтно-відбудовні роботи зі зниженням їхньої собівартості. До таких прийомів можна віднести наявність підводних телевізійних установок із прийомним і передавальним пристроями, можливість зйомки підводних частин споруд за допомогою новітніх цифрових відеокамер, можливість обробки результатів і моделювання процесів бетонування за допомогою комп'ютерної техніки, наявність служби легких водолазів-аквалангістів.

Сучасний розвиток технології ремонту, а також проектування складів гідротехнічного бетону базується на наукових основах, розроблених А.А. Байковим, П.П. Будніковим, Б.Е. Веденєєвим, Ц.Г. Гінзбургом, В.І. Дмитревським, І.Є. Картелевим, В.А. Кіндом, С.Н. та ін. Велике значення в розробці основ технології гідротехнічного бетону мають також капітальні праці проф. Н.А. Попова, проф. С.А. Миронова, проф. А.Е. Шейкіна та ін.

Актуальність проблеми ремонту та відновлення несучої здатності конструкцій штучних транспортних споруд і у наш час має місце для більшості регіонів України. Для виконання цих робіт потрібен спеціальний бетон, що відрізняється нерозшаровуваністю, стійкістю у водному середовищі, міцністю, необхідною довговічністю й монолітністю бетонної кладки. Сполучення комплексу наведених властивостей ремонтного бетону можливо досягти оптимізацією складу бетону, вибором хімічно активних компонентів і фізико-хімічною активацією цементної системи. При цьому увага приділяється не тільки вибору компонентів бетону й забезпеченню технологічних властивостей бетонної суміші, але й забезпеченню транспортабельності її трубопроводом, що визначає найбільшу ефективність виконання ремонтних робіт. Очевидно, технологія виконання цих робіт вимагає вдосконалювання й наукового обґрунтування на основі виконаних досліджень властивостей бетонної суміші й гідротехнічного бетону й узагальнення виробничого досвіду в області ремонту

штучних транспортних споруд. При цьому слід враховувати єдину систему вимог до технології ремонтних робіт, виконання яких забезпечувало б необхідну міцність і монолітність бетону при високих техніко-економічних показниках робіт.

Значний внесок у вирішення проблеми відновлення несучої здатності конструкцій транспортних споруд та їх захисту від дії агресивного середовища внесли вітчизняні вчені В.С. Артамонов, В.П. Волков, К.В. Гайдук, В.О. Осипов, та ін.

Особливість експлуатації транспортних споруд складається в необхідності забезпечення безперебійного руху потоків. Проведеними дослідженнями [1] встановлено незадовільний технічний стан більшості транспортних споруд України. Тому поряд з будівництвом нових споруд особливу важливість здобуває необхідність ремонту, реконструкції або відновлення несучої здатності таких споруд. При цьому найчастіше ремонту підлягають елементи конструкцій, що експлуатуються в обводнених умовах, наприклад, опори мостів, тунелі й т.ін. Також треба враховувати, що експлуатація транспортних споруд вимагає захисту від шкідливого впливу ґрунтових вод. Традиційне усунення водопритоків здійснюється такими способами: шляхом відкачки статичних запасів і динамічних припливів підземних вод у межах огорожуючої ділянки з утворенням депресійної воронки, а також огороженням ділянки протифільтраційними екранами.

Осушення є досить трудомістким процесом, рівень техніки якого найчастіше не відповідає вимогам, що не дозволяє застосувати ефективні технологічні схеми й обумовлює високі капітальні й експлуатаційні витрати.

Застосування водозниження, яке здійснюється шляхом відкачки підземних вод, призводить до порушення їхнього природного балансу й режиму. Більш перспективними є способи гідрозахисту, що дозволяють обмежитися водозниженням тільки в межах огорожуючого контуру, уникнувши при цьому порушення природного режиму й знизивши експлуатаційні витрати [2]. Від зовнішніх водопритоків конструкція або споруда захищаються протифільтраційними екранами.

Для ремонту ушкоджених ділянок, що вимагають усунення або зменшення фільтрації, використовують бетон з добавками алюмінату натрію, що представляє суміш глинозему й технічного їдкового натру. Розчини з алюмінатом натрію характеризуються швидким тужавінням, підвищеною водопотребою й стійкістю проти розмиву водою, не розшаровуються й не відокремлюють воду. Бетон з добавками алюмінату натрію застосовують також для закладання мокрих каверн у бетонних конструкціях.

Каверни, що з'явилися в результаті ерозії, розділяють на три групи залежно від їхньої глибини: I - глибиною більш 20 см, II - від 5 до 20 см, III група - менш 5 см. При ремонті каверн I групи застосовують арматурні сітки зі стрижнями діаметром 25 мм і кроком 25x25 см, які приварюють до спеціально встановлених анкерів діаметром 32 мм із кроком 50x50 см. Ремонт каверн II групи виконують анкерами діаметром 20 мм із кроком 50x50 см, до яких приварюють арматурні стрижні діаметром 10 мм і кроком 10x10 см. Каверни глибиною до 5 см замоноличують без анкерівки й армування [3].

Відновлення водонепроникності й міцності великих масивів бетону виконують такими способами: ін'єкційними, гідроізоляційними й комбінованими. Спосіб і матеріали для ін'єктування вибираються в кожному конкретному випадку.

Найпоширенішими способами усунення фільтрації в штучних спорудах є цементация й силікатизация. З відомих способів [4] з урахуванням специфіки експлуатації різних транспортних споруджень найбільш прийнятним способом для утворення протифільтраційної завіси є цементация.

Сутність цементации полягає в тому, що у бетонний масив через пробурені щілини нагнітають цементний розчин, який після затвердіння перетворюється в щільний водонепроникний і нерозчинний у воді матеріал, що заповнює тріщини й порожнечі, які ущільнюють бетон і перешкоджають фільтрації через неї води [5].

Нагнітання ін'єкційного розчину у бетонний масив виконується при температурі не нижче +5°C і при глибині тріщини більш 2 м здійснюється двома установками: перша установка - на середині тріщини й друга - на відстані не

менш 10 см від поверхні бетонного елемента. Приготування ін'єкційного розчину відбувається безпосередньо перед початком нагнітання. Цементация здійснюється шляхом нагнітання цементного тіста у пошкоджений елемент споруди.

Для цементации застосовують портландцемент марки не нижче 400, звичайно використовується сульфатостійкий, а також тампонажний портландцемент. Для прискорення тужавіння цементних розчинів застосовуються рідке скло й хлористий кальцій. Для підвищення рухливості цементних і цементно-піщаних розчинів використовуються такі добавки: сульфітно-спиртова барда (ССБ) - 0,1...0,25% від маси цементу; хлористий кальцій - 0,5... 3% від маси цементу.

Застосування звичайних цементно-піщаних розчинів для улаштування захисних екранів, як показала практика [6], недостатньо ефективно з наступних причин: такі розчини не характеризуються необхідним ступенем водонепроникності й стійкості до агресивних впливів, забезпечення проектної міцності зчеплення пошкодженого бетону конструкцій з розчином не представляється можливим, деформативні характеристики розчинів відрізняються від характеристик бетону конструкцій, розчини характеризуються тривалими строками тверднення. До числа недоліків відноситься також ускладнення технологічного процесу ремонтно-відбудовних робіт при негативних

12 температурах повітря. У зв'язку з цим необхідна розробка нових матеріалів, що забезпечують проектні властивості захисного шару.

Поряд із протифільтраційним захистом, при проведенні ремонтно-відбудовних робіт на транспортних спорудах особливе значення має гідроізоляція стиків й зниження проникності бетону. Критеріями вибору гідроізолюючого складу є проникність матеріалу конструкції або заобробного простору, яка характеризується коефіцієнтом проникності або фільтрації, і радіус поширення розчину [7].

1.2 Забезпечення експлуатаційних властивостей елементів транспортних споруд

Забезпечення стійкості опор мостів, оброблення тунелів і інших транспортних споруд є найважливішою умовою ефективної й безпечної експлуатації. Причини утворення деформацій у конструкціях можуть полягати в наявності поверхонь ослаблення, що викликається фільтраційною нестійкістю матеріалу конструкцій [8]. Виникаючі деформації звичайно пов'язані з обводненими ділянками, тому усунення обводненості створює передумови для підвищення стійкості штучних транспортних споруд. Однак протифільтраційне зміцнення ґрунтів, у яких розташовуються елементи транспортних споруд, не знайшло поширення через високу вартість робіт, складності визначення зон ослаблення й недосконалої технології. Недосконалість технології полягає також у неможливості використання для таких робіт звичайних цементних розчинів, оскільки останні не мають високого ступеня протифільтраційного захисту. Тому улаштування водонепроникних екранів розглядається як одна зі складових частин комплексу робіт зі збільшення терміну служби транспортних і гідротехнічних споруд, заглиблених у водонасичені ґрунти.

Як правило, транспортні споруди являють собою складну технічну систему, кожний елемент якої виконує задану функцію з певним запасом міцності. При цьому не тільки окремі елементи й конструкції об'єкта характеризуються різною довговічністю, але і їхні складові деталі. Із цих причин експлуатаційна надійність різних елементів споруд також відрізняється, і відмова конструкцій відбувається за правилом слабкої ланки.

Для прийняття правильних і обґрунтованих інженерних рішень з відновлення й посилення несучої здатності та підвищення довговічності споруди найбільш важливим та разом з тим найбільш складним є завдання визначення слабких ланок структури споруди, встановлення їхнього взаємовпливу з різними рівнями структури й виявлення причинно-наслідкових зв'язків з різними видами пошкодження конструкцій. Складність вирішення цього завдання

пояснюється різноманіттям видів негативних впливів, умов експлуатації об'єкта, а також розмаїтістю конструктивних рішень самих споруд.

У цьому зв'язку очевидно, що слід розглядати споруди, які підлягають відновленню, як єдину систему, що містить взаємозалежні конструктивні елементи. При цьому виявлення причинно-наслідкових зв'язків між впливами експлуатаційного середовища й видами руйнувань, а також вирішення наведених вище завдань розглядаються на трьох рівнях: перший - окремий елемент; другий - окрема конструкція, тобто сукупність окремих елементів, здатних до єдиного сприйняття функціонального навантаження, наприклад, опора мосту, оброблення тунелю; третій - функціональний об'єкт, сукупність конструктивних елементів, об'єднаних в єдину структуру, що визначає форму й функціональне призначення всієї споруди [9].

Просторові відносини елементів виділених рівнів системи визначають структуру об'єкта. Довговічність споруди спеціального призначення багато в чому визначається цілісністю її структури, що зберігається й функціонує до певного рівня впливу різних факторів зовнішнього середовища, не перевищуючого деякого критичного значення. При перевищенні такого рівня відбувається адаптація структури споруди до умов зовнішнього середовища, що змінилися. При цьому первісна цілісна структура за рахунок перерозподілу виникаючих напружень в елементах споруди переходить за правилом слабкої ланки у нову дискретну структуру. Для споруд, основними структурними елементами яких є бетонні й залізобетонні конструкції, процес такої трансформації пов'язаний з порушенням суцільності (монолітності) бетону. У всіх випадках трансформація структури споруди є першопричиною або наслідком змін, що відбуваються на різних її рівнях [10].

У результаті аналізу причинно-наслідкових зв'язків змін структури споруд встановлена можливість виділення трьох основних груп факторів, що чинять негативний вплив на стійкість структури споруди й знижують її довговічність. Сюди відносяться деструкція основних конструкційних матеріалів, екстремальні навантаження й впливи на конструкції споруди, а також експлуатаційні порушення. У реальних умовах ці фактори перебувають у

складній взаємодії, що характеризується випадковістю й невизначеністю. При цьому взаємодія одних факторів може привести до різкого загострення впливу інших факторів.

При дії факторів першої групи процес трансформації структури споруди й втрати її працездатності походить від першого рівня структури до третього. При цьому первісні зміни структури споруди пов'язані зі зміною фізичних властивостей бетону й обумовлені корозійними процесами, що відбуваються в матеріалі при різних видах фізичних, хімічних і біологічних впливів [11].

Зміни, що відбуваються на першому рівні й пов'язані з деструкцією конструкційного матеріалу, приводять до виникнення неприпустимих напружень у конструкціях споруди (другий рівень), а потім до порушення цілісності структури всієї споруди (третій рівень) за рахунок появи тріщин і руйнування окремих елементів або втрати системоутворюючих зв'язків між окремими елементами й конструкціями з виключенням їх із загальної структури споруди. Такий процес пошкодження бетону й залізобетону носить, як правило, тривалий характер і може бути зупинений проведенням заходів щодо консервації матеріалу від руйнуючих факторів.

Інший вид трансформації цілісної структури споруди в дискретну визначається другою групою факторів - екстремальними впливами та навантаженнями на конструкції споруди. Цей процес характеризується раптовою зміною умов середовища та може бути викликаний фізичними явищами - осіданням ґрунту, виходом ґрунтових вод на поверхню, механічними ударами. У цьому випадку пошкодження й деформації з'являються на другому рівні структури споруди - у конструкціях і елементах жорсткості - і одночасно приводять до втрати суцільності бетону (перший рівень) і цілісності структури всієї споруди (третій рівень). Такі зміни структури споруди сприяють доступу агресивного середовища усередину структури матеріалу, що визначає подальші зміни в структурі споруди по першому виду трансформації.

Третя група факторів, що негативно впливають на довговічність конструкційного матеріалу й провокують пошкодження структури споруди відразу по двох видах трансформації, пов'язана з порушеннями режимів експлуатації.

При цьому відбувається руйнування основних несучих елементів споруди й знижується стійкість їх до різного роду силових впливів [12].

Основу для розробки та ухвалення рішення про заходи щодо відновлення несучої здатності й суцільності пошкоджених елементів споруди складають результати інженерного аналізу й експертної оцінки поведінки споруди певної конструктивної системи після тривалого строку експлуатації, а також статистичні дані й класифікація пошкоджень для визначення їхньої небезпеки й можливості запобігання їх появи.

Як показують результати обстежень транспортних і гідротехнічних споруд [13], у 70% випадків виявлені конструкції з порушеною суцільністю бетону у вигляді тріщин різного типу. У спорудах, що піддаються динамічним навантаженням, кількість конструкцій з порушеною суцільністю ще більше, тут практично відсутні елементи, у яких не було б тріщин. Слід також зазначити, що косметичне закладання тріщин у конструкціях споруд, що експлуатуються у вологому середовищі, не відновлює суцільності бетону, тому при повторних динамічних впливах спостерігається нагромадження й розвиток пошкоджень [14].

У результаті систематизації й статистичного аналізу визначені п'ять основних видів порушення суцільності бетону штучних транспортних споруд: одиночні тріщини; розвинені тріщини, що перетинаються; численні розвинені сітчасті тріщини; зминання, руйнування й викрашування бетону; оголення арматури з руйнуванням бетону.

Як витікає з проведеного аналізу, довговічність споруд залежить від ряду факторів, характер яких обумовлений звичайним або передчасним зношуванням, а також зниженням несучої здатності елементів споруди, пов'язаним з порушеннями умов експлуатації та проявами екстремальних силових впливів. У результаті дії та взаємного впливу цих факторів відбувається адаптація споруди до нових умов за рахунок трансформації цілісної твердої структури у дискретну, менш жорстку. Така трансформація може відбуватися за рахунок руйнування загальних системоутворюючих зв'язків і елементів або ж внаслідок порушення суцільності основних конструкційних

матеріалів.

Деформації елементів споруд, що призводять до порушення їхньої стійкості, викликаються наступними причинами [15]: гідростатичним тиском води, що створюється внаслідок низького коефіцієнта фільтрації ґрунтів; підвищеною кількістю атмосферних опадів і витокami побутових і технічних стоків, що викликають підйом рівня підземних вод; незадовільним станом дренажної системи; незначним зчепленням по контактах між шарами ґрунту, що взаємозалежно з виносом піщаних і пилуватих часток (суфозією); тривалим застоєм води, здатної інфільтруватись; збільшенням динамічних навантажень при проходженні транспортних засобів і роботі механізмів; наявністю ослаблених ділянок у масиві споруди.

Основним заходом щодо забезпечення стійкості транспортних і гідротехнічних споруд є дренаж, у результаті якого досягається усунення або обмеження фільтраційних деформацій, знижуються вологість ґрунту й градієнти напору ґрунтових вод. Найбільш часто для усунення деформацій споруд застосовуються підземний і поверхневий дренаж, а також спорудження дамб, підпірних стін, закріплення палями, штангами, анкерами [16].

1.3 Сучасні методи ресурсозбереження при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт на транспортних спорудах

До сучасних методів ресурсозбереження при проведенні ремонтних робіт на транспортних спорудах відносяться рецептурно-технологічні, механічні, хімічні, фізичні та комплексні. Найбільш широке застосування знаходять рецептурно-технологічні рішення, що включають спрямоване структуроутворення, оптимізацію складів бетону, а також комплексні рішення, що включають різні способи модифікації бетонних сумішей. Однак одержання бетонів зі специфічними експлуатаційними властивостями, які призначені для відновлення несучої здатності конструкцій транспортних споруд, неможливо без

модифікації структури бетону активними компонентами - регуляторами основних властивостей. Актуальність використання таких добавок настільки велика, що, як відзначено В.Г. Батраковим [17], вони досить точно можуть бути визначені як модифікатори бетону.

На сучасному етапі розвитку технології бетонів використовуються різноманітні добавки, що відрізняються як хімічним складом і механізмом дії на цементні системи, так і функціональним призначенням. Однак теоретичні дані недостатні для оцінки різних напрямків застосування добавок до бетону. Тому становить інтерес класифікація добавок за технологічним ефектом [18]. В основу цієї класифікації покладений технологічний ефект дії в цементних системах: регулювання тужавіння й тверднення, поліпшення легкоукладальності бетонної суміші, повітрязалучуючі, протиморозні, інгібітори корозії й т.ін. В останні роки класифікація доповнилася порошками - заміниками цементу [19].

Вибір основних напрямків використання добавок для здійснення ефективного ресурсозбереження в сучасній технології бетону вимагає розробки нового підходу до оцінки й класифікації добавок. В основу цього підходу покладені принципи функціонального призначення, техніко-економічного й соціального ефекту. Така класифікація наведена в [20].

У загальному обсязі хімічних добавок поверхнево-активні речовини (ПАР) відносяться до одного з універсальних, доступних і гнучких способів регулювання властивостей бетону. У вітчизняній і закордонній практиці ресурсозбереження найбільше застосування одержали технічні лігносульфонати. Недоліком цих добавок є неоднорідність сировинної бази. Разом з тим, ефективність застосування добавок технічних лігносульфонатів (ЛСТ) досить висока [21]. У наш час відомо більше двохсот методів модифікації технічних лігносульфонатів, але широке застосування одержали лише близько 20.

Багаторічний досвід свідчить про високу ефективність використання добавок на основі виробництва кормових дріжджів при виготовленні спирту [22]. Добавки плаву дикарбонових кислот [23], а також УПБ і УПБ-М дозволяють знизити витрату цементу до 15%. Однак є численні дані про зміну морфології

кристалогідратних фаз у присутності ПАР. Молекули ПАР, що адсорбуються на цементних частках, створюють екрануючий ефект, блокуючи клінкерні мінерали від взаємодії з водою й сповільнюючи процеси гідратації в'язучої речовини й змінюючи структуру цементної системи убік утворення погано закристалізованої, рентгеноаморфної. Встановлено, що основним адсорбентом лігносульфонатів є алюмінати. У системі С3А - CaSO₄ - H₂O добавка ЛСТ уповільнює утворення трьохсульфатної форми гідросульфоалюмінату кальцію, що протікає у відносно слабкій за міцністю структурі. Відповідно, подальше перетворення ГСАК-3 у моноссульфатну форму у повільно тверднучій системі викликає деструктивні явища, які негативно впливають на структуру й властивості цементного каменю.

Цікавий той факт, що вплив ПАР у невеликих концентраціях на процеси гідратації носить переважно кінетичний характер, тобто при цьому добавки не можуть принципово змінити розчинність вихідних в'язучих і новоутворень [24]. Показано [25], що кінетика гідратації клінкерних мінералів в'язучої речовини, що підкоряється законам дифузії, змінюється відносно мало. Незначно знижується і швидкість росту кристалів, тому що процес також іде з дифузійним контролем. Звідси випливає, що ПАР необов'язково повинні адсорбуватись на всій поверхні твердої фази, їхній ефект може бути обумовлений адсорбцією на активних центрах, у ролі яких можуть виступати частки мікронаповнювача.

Таким чином, неможливість одержання універсального однокомпонентного регулятора реологічних і структуроутворюючих властивостей цементних систем є основною причиною пошуку комплексних ефективних добавок для високоміцних бетонів.

Останнім часом все більше застосування знаходять комплексні добавки, що дозволяють значною мірою усувати недоліки, властиві індивідуальним добавкам. Питання сполучення органічних ПАР й неорганічних електролітів з метою одержання композиційних модифікаторів цементних систем надзвичайно складні. При виборі компонентів враховується ефект їхнього взаємовпливу й результуюча дія у воді замішування, у рідкій фазі цементного тіста, у

цементному тісті, розчині й у бетонній суміші. При цьому ставиться завдання одержання максимальної ефективності дії на певну характеристику цементної системи або досягнення оптимальності дії за декількома показниками.

Певний інтерес викликає робота [26], автори якої розглядають питання зниження селективності добавок і пропонують сполучати високомолекулярні ПАР аніонного класу, ефект пластифікації яких обумовлений електростатичною взаємодією дисоційованих іонів ПАР, які адсорбуються на поверхні твердої фази, з міцелоутворюючими неіоногенними ПАР, де пластифікація обумовлюється осмотичними силами.

Поширено застосування добавок електролітів і ПАР. Автори [27] відзначають, що добавки ПАР як пластифікатори малоефективні у високоалюмініатних цементах, а добавка гіпсу дозволяє відновити пластифікуючу дію ПАР. Ці автори пояснюють такий ефект зменшенням початкової адсорбції ПАР. Блокування активних центрів електролітами подовжує термін повного поглинання гідрофілізуючих ПАР. Спільним введенням таких добавок досягається поліпшення структурно-механічних властивостей цементного каменю [28].

Викликають інтерес результати досліджень комплексних добавок - електролітів і гідрофілізуючих ПАР, у яких електроліти мають плівкоутворюючу здатність у результаті реакції з вибраними клінкерними мінералами. ПАР, адсорбуючись на зародках кристалізації такої плівки, виявляються залученими у неї у вигляді прошарків між кристалами, що послаблює бар'єрні функції фазової плівки [29].

Розробка й застосування суперпластифікаторів, що характеризуються значно більшою ефективністю у порівнянні з використовуваними при створенні комплексних добавок пластифікаторами, створили передумови для розробки на їхній основі поліфункціональних модифікаторів. Властиві суперпластифікаторам недоліки можуть бути усунуті при застосуванні їх у комплексі з добавками інших класів.

Застосування суперпластифікаторів дозволило відновити більш широке застосування литого бетону. Головною перевагою його є значне зниження трудовитрат і поліпшення умов праці. Так, застосування СП фірмою "Melment

L-10” (Німеччина) дозволяє одержувати бетонну суміш рухливістю 20 см замість вихідної 7 см. Підвищена рухливість бетонної суміші полегшує транспортування її трубопроводом, що має велике значення при проведенні ремонтних робіт на транспортних спорудах.

Однак, істотним недоліком литих бетонних сумішей із суперпластифікаторами є недостатня тривалість розріджуючого ефекту у часі. Слід також врахувати високу вартість суперпластифікаторів, а також обмеженість їхнього виробництва в Україні.

З метою використання менш дефіцитної сировини в Україні створений ефективний модифікатор бетону ПФМ-БС [30], що не уступає за якістю суперпластифікаторам.

Таким чином, численні дослідження різних ПАР та сумішей з електролітами, в основному, містять опис окремих технологічних, фізико-механічних та експлуатаційних характеристик, лише частково відображаючи теоретичні аспекти впливу добавок на всі стадії гідратаційного тверднення.

Виходячи із проведених досліджень і аналізу виробничої практики, для забезпечення належних експлуатаційних властивостей бетонів, призначених для ремонту та відновлення транспортних споруд, поряд із пластифікаторами необхідне застосування активних мінеральних наповнювачів. Значну увагу питанню застосування мінеральних наповнювачів і властивостям наповненого бетону приділено у роботах В.І. Соломатова і його школи [31], О.М. Пшінька і його школи [32].

Оскільки економічність бетонів зростає при заміні частини цементу мікронаповнювачем, останні роки вчені повернулися до досліджень і застосування мікронаповнювачів, але вже на іншому якісному рівні. Різними дослідниками наводяться дані про заміну 10...50% цементу мікронаповнювачем без погіршення фізико-механічних властивостей бетону [33].

Добавки-мікронаповнювачі застосовують природні та штучні, у тому числі техногенні продукти промисловості. Штучні мікронаповнювачі при високій питомій поверхні та інших факторах проявляють активні властивості, а зерна їх здобувають модифіковану поверхню [34].

Численні дослідження показують, що мікронаповнювачі роблять значний внесок у формування структури та властивостей бетону. Так, у мікробетоні відбувається більш глибока гідратація у присутності мікронаповнювача, що підтверджується рентгенівськими дослідженнями [35]. Мінерали мікронаповнювача беруть участь у процесі тверднення, обумовлюючи створення мікрмініерального кістяка у цементному камені. Кварцові мікронаповнювачі поліпшують структуру цементного каменю, створюючи більшу гомогенізацію, про що свідчать роботи П.О. Ребіндера, Н.Б. Ур'єва та інших дослідників [36]. Однак при існуючому рівні технології бетону застосування активних наповнювачів призводить до незначного приросту міцності бетонів.

В останні роки розроблена технологія модифікованих бетонів з високими експлуатаційними властивостями [37]. В основі технології лежить застосування комплексного модифікатора МБ-1, що містить мікрокремнезем, суперпластифікатор і регулятор тверднення. Однак, з огляду на високу витрату цементу (500 кг/м^3), потенційні можливості застосування мікронаповнювача авторами [38] не використані.

Істотним резервом підвищення міцності бетонів є вдосконалювання способів приготування бетонної суміші. У цей час увагу вітчизняних і закордонних дослідників зосереджено на вдосконалюванні традиційних методів змішування компонентів суміші, основними з яких є способи активації цементних систем.

Відповідно до теорії абсолютних швидкостей реакцій Ейринга, будь-який процес, що протікає в часі, незалежно від фазового складу характеризується тим, що початковий стан речовини переходить у кінцевий через проміжний, що є критичним для даного процесу. Саме цей проміжний, критичний стан речовини, що є кінцевим продуктом активації, називається активованою речовиною.

Ареніус [39], що першим застосував поняття «активована речовина», приймав, що активні молекули перебувають у рівновазі з неактивними. Теорія абсолютних швидкостей Ейринга також припускає, що активований комплекс перебуває у термодинамічній рівновазі з вихідними речовинами. Однак константа рівноваги в цьому випадку не є звичайною константою рівноваги,

оскільки активований комплекс перебуває у процесі зміни в одному напрямку. Така нерівноважність системи з активованою речовиною відзначається й іншими авторами. Так, у роботі Мейєра [40] активованими твердими тілами називаються тіла з термодинамічно та структурно нестабільним розташуванням елементів кристалічних ґрат, що відрізняються підвищеним значенням вільної ентальпії у порівнянні з ідеальним або злегка порушеним станом речовини. К.А. Осипов [41] вважає, що активований стан атомів або їхніх різних сполучень у твердих тілах являє собою граничний, критичний стан термодинамічної нестійкості атомних перетворень у кристалі.

Ці автори розглядають ідеальну речовину як деяку нульову з погляду активності точку відліку. Будь-які інші стани речовини розглядаються як активовані в тому або іншому ступені. При цьому активність речовини, як вказується у роботі [42], визначається для твердих тіл елементами реальної структури. Ці елементи, що визначають весь комплекс властивостей даної речовини, являють собою різного роду дефекти структури та супутні їм електричні мікрополя, які називають активними центрами. Таким чином, можна визначити поняття «активована речовина» як речовину, до складу якої входять активні центри, розподілені в об'ємі й на поверхні речовини. При цьому ступінь активності речовини залежить від концентрації цих активних центрів в об'ємі та на поверхні речовини. Очевидно, активація цементної системи повинна припускати процес утворення активних центрів взаємодії в ході реакції гідратації з послідовним розвитком значної кількості структурних зв'язків в одиниці об'єму системи. Більше того, висока енергія активації системи призводить не тільки до кількісного збільшення зв'язків, але і якісної зміни. Отже, будь-який вплив, що активує, можна розглядати як зміну енергетичного стану речовини [43]. Це призводить до якісно нової зміни інтенсивності взаємодій у системі.

Найбільший інтерес представляє зміна енергії активації або іншими словами - зниження висоти енергетичного бар'єра. У роботі [44] наведена класифікація способів зниження потенційного бар'єра E_a , основу якої становлять різні фізико-хімічні процеси. Необхідно відзначити, що поділ на фізичну та

хімічну активації досить умовний й використовується в основному для спрощення класифікації способів активації. Крім того, як фізичний, так і хімічний вплив на систему зводиться до деякої зміни кінцевого продукту реакції гідратації.

Автори [45] відзначають можливість зниження енергії активації за рахунок впливу електричного поля каталізатора. Таким чином, дію каталізатора можна певною мірою розглядати як локальний фізичний вплив на систему, що, імовірно, ідентично впливу електричних полів, які накладаються на іонозбагачену систему.

Авторами [46] спостерігалось диспергування часток при паророзігріві тампонажних розчинів внаслідок виникнення розтягуючих і стискаючих напружень за рахунок періодичності нагрівання - охолодження й прямого механічного впливу струменя пари. При цьому термічний вплив оцінюється як фактор, що збільшує міцність цементного каменю, однак слід зазначити, що існують суперечливі думки з цього приводу. Напевно, істотну роль відіграє швидкість розігріву суміші, стан системи в період температурного впливу, енергія механічного впливу й склад вихідної суміші.

В останні роки одержала розвиток активація компонентів бетонної суміші джерелами високих енергій (застосування високовольтного електричного розряду). Роботи в цьому напрямку [47] свідчать про можливості значного підвищення міцності бетону, а також заміни частини цементу мінеральними добавками, однак така технологія вимагає подальшого вдосконалювання. При дослідженні залежності ефективності активації від тривалості впливу автори [48] вважають, що початкова активація повинна здійснюватися протягом перших хвилин, більш тривалий енергійний вплив може призвести до зменшення досягнутих ефектів зміцнення каменя; при цьому обґрунтовується застосування двохкратної і багаторазової віброактивації. Час повторної віброактивації призначається найчастіше на початку тужавіння або в період між початком і кінцем тужавіння.

Безсумнівно, кожний із зазначених способів активації цементних систем вносить свій внесок у розвиток активаційних технологій, однак слід більш

глибоко враховувати фізико-хімічні особливості ранніх стадій гідратації клінкерних мінералів. Відомі способи активації в'язучих систем не забезпечують оптимізацію структуроутворення. Їхня висока ефективність не повинна істотно ускладнювати технологію бетонів з унікальними властивостями.

Одне з перших місць серед способів активації займає фізико-хімічна активація [49]. В основу технології покладена фізико-хімічна активація в'язучої речовини, що відбувається в реакторі-активаторі. Реактор-активатор являє собою циліндричну ємність з замкнутим трубопроводом. У реактор-активатор подаються цемент у кількості 80% від розрахункового й підігріта вода. В окремій ємності готується орґано-мінеральний комплекс на основі інших 20% кількості води. Активація цементно-водної суспензії починається з моменту введення орґано-мінерального комплексу, супроводжуючись проявом суперпластифікуючого ефекту й впливаючи на процеси формування просторової структури. Післядія активаційної обробки відчувається в композиційному матеріалі протягом тривалого часу його служби завдяки явищам структурної спадковості й збереження певної спрямованості гідратаційного процесу, заданої на початкових етапах перетворення в'язучої речовини у пластичній цементно-водній суспензії.

Цементна система, що активується, в нижній частині реактора-активатора накачується в замкнутий трубопровід і з високою швидкістю викидається в середній частині активатора із двох протилежно розташованих сопел. При зустрічному зіткненні матеріальних струменів створюються умови для прояву ефекту кавітації, що сприяє активізації процесів хімічної взаємодії часток цементу й мікронаповнювача у системі в середовищі хімічного оптимізатора структуроутворення. Носіями кавітаційних зародків є частки мінеральної складової орґано-мінерального комплексу.

Активований цементний клей стисненим повітрям подається до форсунки струминного змішувача. До іншої форсунки струминного змішувача подається розрахункова кількість дрібного заповнювача. Напрямок руху компонентів вибирається таким чином, щоб струмені активованої в'язучої речовини та заповнювача перетиналися під певним кутом. При цьому заповнювач

переміщується з в'язучою речовиною, а поверхня часток заповнювача торкретується цементним клеєм.

Проведення ремонтно-відновлювальних робіт на транспортних спорудах можливо за допомогою пневмоструминного способу бетонування активованою цементною системою. Значне підвищення міцності торкретбетону на основі активованої цементної системи пояснюється декількома причинами. Слід зазначити, що початок тужавіння суміші відбувається майже миттєво внаслідок наявності активаційного ефекту, що також сприяє підвищеній адгезії до поверхні, що торкретується. При цьому досягається зниження кількості відскоку на вертикальних поверхнях до 6...7%, на стельових поверхнях - до 8...9%.

Розроблений пневмоструминний спосіб бетонування дозволяє виконувати ремонт обводнених гідротехнічних і транспортних споруд [50]. Як відомо, такі види робіт є складними й дорогими внаслідок необхідності застосування спеціальних видів в'язучих та полімерів. Пневмоструминний спосіб нанесення захисного шару на пошкоджену поверхню характеризується відносно низкою собівартістю, а також високими якісними показниками.

1.4 Забезпечення зчеплення нового бетону зі старим при відновленні споруд

Якість ремонту штучних транспортних споруд і відновлення їхньої несучої здатності в основному визначається міцністю зчеплення нового бетону з поверхнею старої кладки. Аналіз стану виконаних ремонтних робіт показав, що у більшості випадків має місце розшарування нового бетону зі старим. Особливо це спостерігається при малій товщині ремонтного шару. Практично відновити несучу здатність конструкцій штучних споруд вдається за рахунок істотного збільшення площі арматурних і сталевих прокатних деталей, але навіть у цих умовах спостерігається відшарування захисного шару бетону. Такі

відшарування спостерігаються вже після закінчення річного терміну після ремонту. Вважається, що причиною таких ранніх руйнувань є низька якість ремонтних робіт [51]. Однак причини порушення суцільності нового масиву носять більш складний фізико-хімічний характер. На підставі виконаних експериментів і проведених натурних спостережень за різними транспортними спорудами встановлено [52], що міцність зчеплення нового бетону зі старим в основному визначається трьома факторами: дисперсністю і морфологією новоутворень цементної матриці нового бетону; станом поверхні (рельєфом і характером пористості) бетонної поверхні, що ремонтується; фізико-хімічною активністю покриваючих шарів бетону споруди.

Останній фактор має особливо важливе значення при ремонті конструкцій бетонних споруд, що знаходяться у зоні змінного рівня води. У цьому випадку товщина й фізико-хімічна активність покриваючих шарів бетону особливо перешкоджають утворенню надійного контактного шару між новим і старим бетоном. У більшості випадків необхідно механічне очищення такої поверхні, хоча це трудомістка й дорога технологічна операція. В основному, керування міцністю зчеплення повинно здійснюватись оптимізацією першого фактора. Очевидно, що вибір в'язучої речовини та склад цементної матриці створюють передумови забезпечення зчеплення нового бетону зі старим.

Контактне зчеплення, як відомо, на порядок нижче механічного зчеплення за рахунок зачеплення й перетинання контактних шарів нового бетону зі старим бетоном. Досягнення високої міцності зчеплення - досить важке завдання, яке можна вирішити, з одного боку, збільшенням дисперсності новоутворень (зменшенням розмірів часток твердої фази) і створенням умов для набрякання нового бетону, з іншого боку.

Процес зчеплення нового бетону зі старим являє собою окремий випадок явища склеювання, оскільки в обох випадках проявляється дія поверхневих сил, що мають електричну природу.

У будівельній практиці дослідження процесів зчеплення старого бетону з новим проводилися А.А. Гвоздєвим [53], який вивчав міцність зчеплення бетону у швах збірних залізобетонних конструкцій. В.А. Степанян [54], А.В.

Саталкін і Б.А. Сенченко [55] досліджували міцність зчеплення крупного заповнювача із цементною матрицею бетону при ранньому навантаженні. Роботи О.В. Кунцевича [56], а також З.П. Пулатова й Х.Л. Усманова [57] присвячені вивченню в'язучих властивостей мінеральних в'язучих речовин. Дослідження електричної й фізико-хімічної природи адгезійних сил проведені Н.А. Кротовою [58], причому теорія відносно підвищення зчеплення мінеральних будівельних матеріалів одержала розвиток у праці П.О. Ребіндера [59].

Комплексні дослідження зі зчеплення старого й нового розчину й бетону з арматурою проведені американськими вченими. Поряд із цим, досліджений опір зрізу зчеплення між старим і новим бетоном [61]. У Каліфорнійському університеті ведуться дослідження зі зчеплення старого бетону з новим у горизонтальних швах гребель, при цьому основна увага приділяється дослідженню впливу способів укладання бетону й обробки поверхні сполучення на міцність зчеплення [62].

У нашій країні в цей час приділяється недостатньо уваги питанням підвищення зчеплення й контролю якості покриттів. На відміну від закордонних нормативних документів, у вітчизняних відсутні деякі необхідні характеристики поверхні підкладки при проведенні відбудовних робіт. Методи контролю якості укладеного бетону недосконалі, не випускаються призначені для цих цілей прилади.

При дослідженні процесів зчеплення значний інтерес представляє співвідношення когезійних і адгезійних сил. Когезійні сили відбивають внутрішнє зчеплення часток півки, що склеює, між собою, адгезійні сили відбивають процеси, що відбуваються на поверхнях тіл, що склеюють. Адгезійні сили, за Б.В. Дерягіним, характеризуються тиском адгезії в МПа [63].

На думку Б.В. Ільїна, природа молекулярних сил (внутрішнього зчеплення) і адсорбційних сил (на поверхні розділу) та сама [64]. Відмінність адсорбційних взаємодій від інших видів молекулярних взаємодій полягає в тому, що вони діють на поверхнях розділу фаз. При зчепленні адгезійної півки з поверхнями тіл, що склеюються нею, її молекули взаємодіють із молекулами цих тіл.

Таким чином, для підвищення міцності зчеплення нового бетону зі старим необхідно виконувати підготовку поверхні, що підлягає ремонту, очищенням від пошкодженого шару, а також догляд за свіжоукладеним шаром бетону до досягнення ним 70% проектною міцності.

Різні випадки зчеплення об'єднані спільністю закономірностей, однак в окремому випадку зчеплення бетонних поверхонь слід враховувати специфіку процесу. У загальному випадку зчеплення можливо різне співвідношення величин сил когезії й адгезії. Можливі випадки як переваги адгезійних сил над когезійними, так і їхньої рівності, а також переваги когезійних сил над адгезійними. При з'єднанні гладких і непористих поверхонь основним фактором, що визначає міцність зчеплення, є спорідненість плівки, що склеює, і поверхні, а також міцність на розрив цієї плівки. При з'єднанні пористих поверхонь, наприклад, бетону, специфічна спорідненість поверхні й плівки, що склеює, менш істотна. У цьому випадку основна увага приділяється здатності клею проникати у пори. При з'єднанні пористої поверхні хімічно споріднених тіл з адгезійною плівкою ефект дії адгезійних сил істотно підвищується. Міцність зчеплення збільшується настільки, що при великих навантаженнях розрив може відбутися не у місці зчеплення поверхонь, а по самих тілах.

Оцінка якості зчеплення нового бетону зі старим здійснюється залежно від місця руйнування. Можна виділити наступні випадки руйнування [65]: відрив по межі «покриття - бетон» характеризує дійсну величину зчеплення між елементами, при цьому величина показника визначається якісним рівнем виконання заданих технологічних операцій; відрив по бетону, при цьому величина показника характеризує знижену міцність поверхневого шару бетону; руйнування по покриттю визначає міцність матеріалу покриття на відрив.

При контролі якості зчеплення нового бетону зі старим з однаковим характером руйнування досить трьох визначень в аналізованій частині конструкції. При «змішаному» характері руйнування (по різних варіантах) Проводяться додаткові виміри.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ НА АКТИВОВАНІЙ В'ЯЖУЧІЙ РЕЧОВИНІ

2.1 Аналіз вологісного стану бетону на активованій в'язучій речовині в часі

Традиційно виконання робіт при зведенні та ремонті транспортних споруд, частково або повністю покритих водою, здійснюється насухо за допомогою кесонів, перемичок і опускних колодязів, що вимагає проведення додаткових робіт з осушення котловану, організації водовідливу, подачі стисненого повітря. Однак з економічної точки зору доцільно при будівництві та ремонті споруд укладати бетонну суміш, приготовлену звичайним образом на повітрі, прямо у воду, уникаючи будівництва складних споруд, крім лаштунку, що визначає форму майбутнього бетонного масиву. У зв'язку з цим доцільно провадити будівельні та ремонтно-відновлювальні роботи на транспортних та гідротехнічних об'єктах у період року, що характеризується позитивними температурами навколишнього середовища. Окремо в ході досліджень приділено увагу процесам структуроутворення цементної матриці бетону в температурному діапазоні 25.. 40°C.

Як показали дослідження [66], вплив гігromетрії бетону на експлуатаційні властивості найчастіше перевершує температурний вплив середовища. Гігromетричні властивості бетону споруди при проведенні відбудовних робіт впливають на повноту протікання реакцій гідратації в'язучої речовини не тільки в тонкому ремонтному шарі бетону, але й у бетонному масиві в цілому. Гігromетрія бетону поєднує комплекс характеристик водовмісту, вологості та масопереносу бетонних елементів, що експлуатуються у змінних умовах зволоження й висушування та визначає не тільки міцнісні, але й деформативні властивості бетону споруди [67].

Спонтанне протікання процесів масообміну в системі «бетон - навко-

лише середовище» можливо тільки в напрямку вирівнювання факторів інтенсивності (тиску, температури, хімічного потенціалу) для всіх частин системи [68]. Досягнення однакового значення цих факторів - границя спонтанного перебігу процесу, а, отже, і умова рівноваги. Фактори інтенсивності (потенціали) вирівнюються за рахунок відповідних екстенсивних факторів (об'єм, енергія, маса).

Для системи «бетон - навколишнє середовище» рівновага досягається в основному в результаті зневоднення бетону шляхом випаровування вологи в навколишнє середовище. Кількість енергії, що витрачається на випар вологи, залежить від інтенсивності її зв'язку з цементною матрицею. Кінцевий рівноважний стан системи «бетон - навколишнє середовище» характеризується з боку навколишнього середовища температурою й тиском водяної пари, а з боку матеріалу - його питомим вологовмістом. Водовтрати бетону в навколишнє середовище можна пояснити, використовуючи теорію сушіння капілярно-пористих тіл [69]. Навіть у звичайних умовах тверднення початкова вологість бетону перевищує його гігроскопічну вологість. В літніх умовах градієнт між гігроскопічною й початковою вологістю бетону дуже великий, що викликає інтенсивне випаровування вологи з бетону. Чим нижче вологість навколишнього середовища й вище температура бетону, тим нижче гігроскопічна вологість бетону.

Бетонна суміш являє собою капілярно-пористу, колоїдну систему, тому волога з бетону випаровується не з геометричної поверхні елемента, а на деякій його глибині, тобто утворюється зона випару вологи з бетону. У межах цієї зони вода з рідкого стану переходить у пароподібний і по системі пор видаляється в навколишнє середовище. По глибині бетону, що твердіє, виникає вологісний градієнт, що є причиною переміщення вологи із глибинних шарів до поверхні. Вода по тонких капілярах піднімається в зону випаровування. По мірі сушіння великі капіляри-пори збезводнюються, у них входить повітря та заміщає воду, утворюючи капілярні меніски. Цей період зневоднювання бетону характеризується постійною швидкістю випаровування.

Період постійної швидкості випаровування залежить від масивності бе-

тонних елементів і характеру структури бетону. Поки в результаті вологопровідності бетону зменшення води із зони випаровування заповнюється новою вологою, що надходить із глибини бетонного елемента, процес протікає стабільно. Через певний проміжок часу капілярний стан води в поверхневих шарах води змінюється на канатний, що різко знижує вологопровідність.

Наступний період випаровування залежить від властивостей бетону, що твердне, і параметрів зовнішнього середовища. Особливо великого значення в цей період набуває термостан бетону. Як встановлено А.В. Ликовим [70], волога в колоїдному тілі переміщується напрямком потоку тепла, якщо всередині тіла існує перепад температури.

В літніх умовах, якщо бетонний елемент перебуває в тіні, термодифузія уповільнює випаровування вологи з бетону й, навпаки, прискорює його, якщо бетон піддається дії прямих сонячних променів і температура його перевищує температуру повітря.

За даними експериментів, що відповідають дослідженням [71], розходження гігromетрії бетону нормального і природного тверднення значне. Відмінними є величини хімічно й фізично зв'язаної води, а також кількість вологи, що випарувалася.

І.А. Мощанський [72] відзначає, що деформації цементної матриці бетону в ранньому віці при зміні гігromетричного стану супроводжуються розривом міжзернових контактів. Цей процес призводить до уповільнення зростання міцності бетону або практично повному його припиненню. Подальше тверднення при повторному зволоженні, як правило, не може повністю відновити всю потенційну міцність бетону. Це пов'язано з незворотністю процесу структуроутворення за умов висихання й зволоження цементної матриці, а також з інтенсифікацією карбонізаційних процесів.

С. В. Александровський [73] за допомогою математичної теорії вологопровідності показав, що розподіл вологи в момент часу τ є функцією $U(x, y, z, \tau)$. Диференційне рівняння вологопровідності бетону, отримане А.В. Чистовим [74] і уточнене С.В. Александровським [75] з урахуванням градієнтів вологості й температур, а також внутрішнього стоку вологи в результаті

гідратації в'язучої речовини, має вигляд:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_B \Delta^2 U - \frac{1}{\gamma} * \frac{\partial H}{\partial \tau} \quad (2.1)$$

де U - вологість у даній точці тіла в будь-який момент часу τ ;

∂ - коефіцієнт дифузії вологи в бетоні при висиханні;

H - функція гідратації в'язучої речовини в бетоні, що визначає кількість хімічно зв'язаної води в одиниці об'єму бетону.

Для визначення інтеграла рівняння (2.1) необхідно знати початкові умови, тобто величину й розподіл вологості по перетину елемента при $\tau = 0$, рівноважну вологість (при $\tau = \infty$), граничні умови - закон волого- і теплообміну між поверхнею тіла й навколишнім середовищем, гідратаційну функцію, а також форму тіла. Точне рішення рівняння (2.1) досить складно навіть для тіл найпростішої геометричної форми й отримано лише при спрощуючих передумовах для тіл найпростішої форми (коефіцієнт a приймається постійним, а функція гідратації рівною нулю). Наприклад, для плоскої стінки, що висихає з двох сторін, при зазначених спрощуючих передумовах і відзначених вище початкових і граничних умовах рішення рівняння (2.1) має вигляд:

$$U - U_P = (U_0 - U_P) \sum_{n=1}^{\infty} A \cos \mu_n \frac{x}{r} \exp(-\mu_n^2 F_0) \quad (2.2)$$

де U_0, U_P - початкова і рівноважна вологості бетону;

$\frac{x}{r}$ - відносна координата точки, в якій визначається вологість (тут r - половина товщини стінки);

F_0 - безрозмірний критерій Фур'є, рівний:

$$F_0 = \frac{a\tau}{R^2} \quad (2.3)$$

A_n, μ_n - коефіцієнти, що визначаються за спеціальними таблицями і залежні від величини критерію Біо:

$$Bi = \frac{\beta}{a} R \quad (2.4)$$

де β - коефіцієнт вологообміну, що характеризує інтенсивність вологовіддачі з поверхні в навколишнє середовище.

Перевірка застосовуваності системи рівнянь (2.1) - (2.4) для опису вологісного стану бетону проведена низкою дослідників [76]. У роботі [77] наведені криві масових водовтрат зразків 10x10x10 см різного складу. Обробка кривих, проведена [78], підтвердила їхній логарифмічний характер, а отже, і положення [79], якими встановлено, що інтенсивність випаровування вологи з бетону змінюється досить точно за експоненціальною залежністю.

Автором [80] показано, що при використанні спрощуючих передумов і відсутності функції гідратації в'язучої речовини при змінних термодинамічних умовах навколишнього середовища дослідні і розрахункові значення вологості бетону можуть значно відрізнятись один від одного. При цьому вірогідність оцінки середньої вологості бетону за емпіричною залежністю [81] мало відрізняється від розрахункової. В обох випадках можливі відхилення реального вологісного стану бетону від його розрахункових значень. Це підтверджується такими положеннями: фізичний вологовміст бетону визначається термодинамічними умовами взаємодії матеріалу й навколишнього середовища з урахуванням трьох незалежних факторів: початкового вологовмісту бетону U_0 , інтенсивності вологовтрат бетонного елемента заданої масивності m до моменту часу τ (зовнішній стік вологи), а також інтенсивністю процесів гідратації в'язучої речовини в часі (внутрішній стік вологи). При цьому m - характеристика масивності бетону - модуль відкритої поверхні елемента, що представляє відношення площі відкритої поверхні (m^2) до його об'єму (m^3).

Зовнішнє середовище, склад бетону та його щільність, масивність бетонного елемента, а також параметри технологічного процесу, взаємодіючи один з одним, впливають на перераховані фактори, що визначає складний характер зміни фізичного вологовмісту бетону в часі.

Розробка інженерного методу оцінки гігromетричного стану бетонних елементів у часі ґрунтується на аналізі експериментальних даних вологовтрат бетону. Дослідження проводилися на зразках різної масивності, в різних умовах

тверднення з використанням бетону на активованій в'язучій речовині. Шляхом зміни розмірів і форми дослідних елементів створювалися умови одномірного, двомірного й об'ємного масопереносу за температурних умов $+25...40^{\circ}\text{C}$ та вологості $40...60\%$ на протязі одного року. Зміна модуля відкритої поверхні досягалася виготовленням зразків різних розмірів. Наприклад, елементи з $m=20\text{ м}^{-1}$ являли собою куби із чотирма бічними ізолюваними сторонами, а куби з п'ятьма ізолюваними сторонами мали $m=10\text{ м}^{-1}$. Елементи з $m=5,0; 2,5; 1,25\text{ м}^{-1}$ представляли пакети кубів довжиною 20, 40 і 80 см відповідно.

Пошарове визначення фізичного та хімічного вологовмісту бетону проведено ваговим методом після висушування проб до постійної маси при $t_1=110\pm 5^{\circ}\text{C}$ та $t_2=550\pm 20^{\circ}\text{C}$. На рис. 2.1 і 2.2 представлені дослідні дані, що відображують зони зміни вологовтрат бетону різного складу при температурах $+25...40^{\circ}\text{C}$. Накопичені дослідні дані з дослідження гігromетрії бетону дозволили використати статистичні методи дослідження для ранжирування факторів, що впливають на цей показник, а також визначення середньостатистичних характеристик процесу масопереносу. Для відбору основних факторів, що впливають на гігromетричні властивості бетону, використаний високоефективний ймовірно-статистичний метод групового обліку аргументів (МГОА). Цей метод успішно застосовувався для аналізу складних процесів у різних галузях науки й техніки [82] і, зокрема, використаний для аналізу міцнісних властивостей бетону [83].

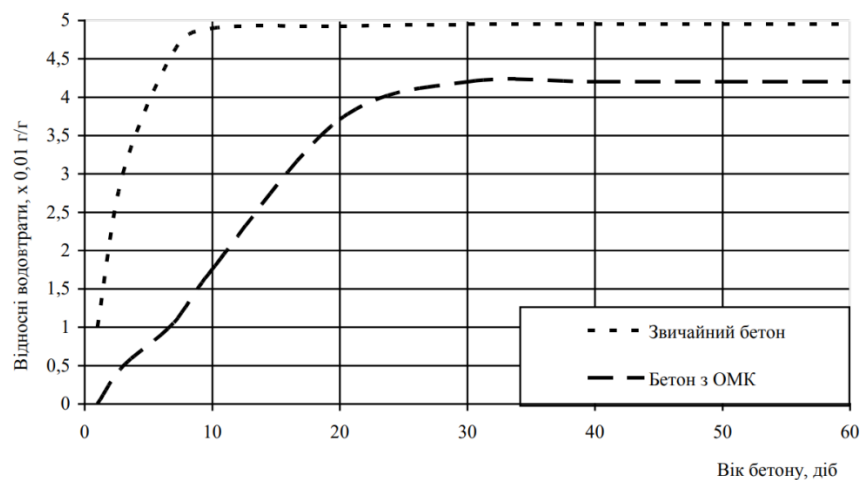


Рисунок 2.1 - Зміна відносних водовтрат бетону немасивних елементів

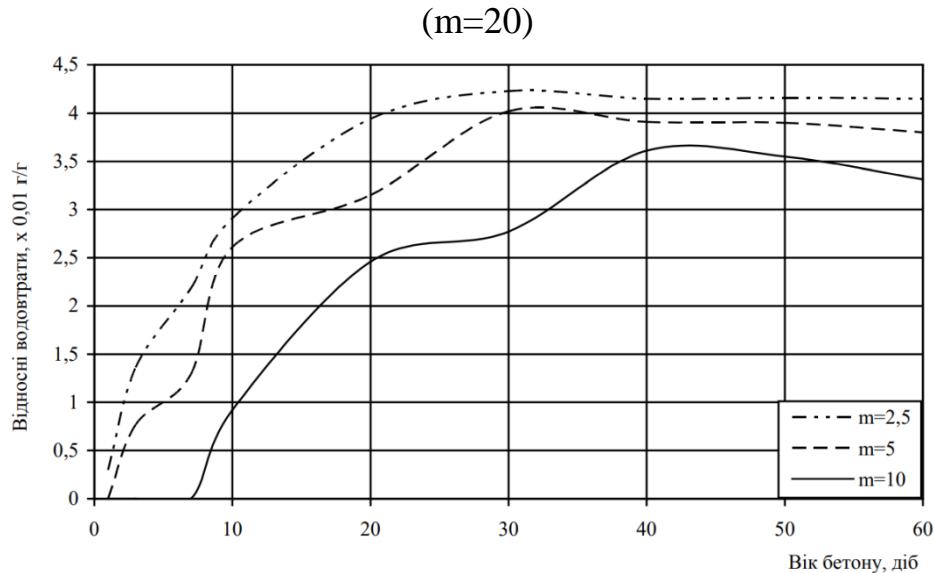


Рисунок 2.2 - Зміна водовтрат бетону на активованій в'язучій речовині в залежності від масивності

Однією з основних характеристик гігрометрії бетону є кінетика його водовтрат у часі. При аналізі масопереносу з бетону транспортних споруд у природних умовах у літній період враховувалися положення теорії вологопровідності, розробленої А.В. Ликовим, С.В. Александровським, І.Б. Заседаєвим та ін. При цьому найбільш доцільно розглянути характер зміни швидкості водовтрат бетонного елемента транспортної споруди залежно від різних факторів.

Як показує аналіз ряду робіт [84-86], зміна швидкості водовтрат бетонного елемента залежно від зміни загального вологовмісту й віку бетону має загальний характер (див. рис. 2.1, 2.2), а криві $\frac{dW}{d\tau}$ є експонентами. Як відомо, така функціональна залежність описує численні природні процеси та знайшла ряд підтверджень у перерахованих вище роботах.

Відомо, що спадаюча експонентна функція $\frac{dW}{d\tau}$ має два характерних параметри: V_0 при $\tau = 0$ - початкову швидкість водовтрат бетону, τ_0 - період релаксації швидкості водовтрат, тобто час, протягом якого швидкість масопереносу зменшується в e разів, де e - основа натуральних логарифмів.

На підставі викладеного процес зневоднювання бетону описується диференціальним рівнянням виду

$$\frac{dW}{d\tau} = V_0 \exp\left(-\frac{\tau_{\text{еф}}}{\tau_0}\right) \quad (2.5)$$

Де $\tau_{\text{еф}}$ - ефективний або дійсний проміжок часу від початку зневоднювання (τ_y) до заданого віку бетону (τ).

При цьому проміжок часу від виготовлення бетонного елемента до початку випаровування вологи τ_y залежить від тривалості τ та інтенсивності догляду за бетоном. Інтенсивність догляду визначається прийнятою технологією, що чисельно враховується коефіцієнтом інтенсивності догляду (k_∂).

Величина коефіцієнта k_∂ визначається дослідним шляхом за наступною методикою. В умовах, аналогічних догляду за виробом, або разом з ним втримуються три зразки 10x10x10 см. У момент закінчення догляду τ визначається зміна їхньої маси й обчислюються середні відносні водовтрати бетону. При цьому розрізняють два протилежні стани матеріалу. При найбільш ретельному догляді або водному зберіганні маса зразка не змінюється (або навіть збільшується), отже, $W < 0$, що відповідає коефіцієнту інтенсивності догляду $k_y = 1$. Другий стан характерний граничною величиною відносних водовтрат бетону ($W_{\text{зр}}$), що твердне без догляду ($k_y = 0$). У всіх проміжних випадках значення коефіцієнта інтенсивності догляду пропорційне відносній залишковій вологості бетону:

$$k_y = 1 - \frac{W}{W_{\text{зр}}} \quad (2.6)$$

де W - відносні водовтрати бетону;

$W_{\text{зр}}$ - граничні водовтрати бетону при відсутності догляду.

Величина граничних водовтрат бетону даного складу може визначатися аналітичним методом. На підставі викладеного ефективний або дійсний період висихання бетону буде рівним $\tau_{\text{еф}} = \tau - k_\partial \cdot \tau_\partial$. При відсутності догляду ($k_\partial = 0$) значення $\tau_{\text{еф}}$ відповідає віку бетону на даний термін τ . Значення k_∂ залежно від виду догляду наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Орієнтовні значення відносних водовтрат бетону та коефіцієнту інтенсивності догляду залежно від його виду [86]

Вид догляду за бетоном	Відносні водовтрати звичайного бетону	Коефіцієнт інтенсивності догляду	
		для звичайного бетону	для бетону на активованій в'язучій речовині
Водне зберігання	Менше 0	1,00	1,00
Тепловологоекмі покриття	0,10...0,15	0,90...0,85	0,99...0,98
Вологоекмі покриття	0,20...0,40	0,80...0,60	0,98...0,97
Безвологісні методи догляду	0,50...0,60	0,50...0,40	0,97...0,96

Інтегрування рівняння інтенсивності вологовтрат (2.5) не представляє складностей і після розділення змінних знаходимо:

$$W = -V_o - \tau_o \exp(-\tau_{эф}/\tau_o) + H, \quad (2.7)$$

де H - довільна постійна інтегрування, що визначається з початкових умов при $\tau = 0$ та $W=0$.

Після підстановки значення H з урахуванням, що при $\tau_{эф} \rightarrow \infty W \rightarrow W_{\infty}$, одержуємо рівняння водовтрат у вигляді:

$$W = W_{\infty}(1 - e^{-\tau_{эф}/\tau_o}) \quad (2.8)$$

Де W_{∞} - граничні водовтрати бетонного елемента при заданих умовах навколишнього середовища та параметрах масопереносу.

Граничні водовтрати бетону визначаються величиною граничного фізичного вологовмісту бетону (U_{ϕ}^{gp}) з урахуванням понижувального коефіцієнта k_{Δ} (див. рисунок 2.2). Визначення цих параметрів виконано шляхом аналізу дослідних даних водовтрат бетонних елементів. Наприклад, вплив зміни складу бетону на кінетику його водовтрат до 60-добового віку наведений на рисунок 2.3. Основний вплив на масоперенос, як показано в роботі [85], чинять

величина В/Ц, витрата цементу, а також масивність бетонних елементів, що характеризується модулем відкритої поверхні. Це положення відповідає дослідним даним, наведеним на рис. 2.4 і 2.5, звідки видно, що в початковий термін тверднення водовтрати прямо пропорційні значенню m поза залежністю від умов зберігання елементів [87]. Зі збільшенням віку для зразків звичайного бетону ця залежність ускладнюється через загасання масопереносу в немасивних елементах і його продовженні в масивних зразках. Однак загасання процесів характерно для елементів будь-яких розмірів. Експериментально встановлено, що величини водовтрат зразків бетону на активованій в'язучій речовині приблизно однаково низькі незалежно від наявності догляду за бетоном, що дозволяє не вважати за необхідне забезпечення догляду за бетоном при проведенні ремонтно-відбудовних робіт на транспортних спорудах. Це дозволяє знизити собівартість відновлення експлуатаційних властивостей конструкцій.

Визначимо загальні характеристики гігromетричного стану бетону й, на-самперед, відносний початковий водовміст бетону [88]:

$$U_0 = \frac{В/Ц}{1+x+y} \quad (2.9)$$

де x , y - масові співвідношення дрібного й крупного заповнювачів в одиниці об'єму бетону (1: x : y).

Теоретичну граничну кількість хімічно зв'язаної води стосовно твердого кістяка бетону, приймаючи $U_x^{gp}=0,2Ц$, слід визначати з урахуванням ступеня гідратації, що для звичайних бетонів залежить від умов навколишнього середовища й перевищення фізичного вологовмісту над мінімальним рівнем вологості, здатним забезпечити перебіг реакцій гідратації в'язучої речовини. Отже, ступінь гідратації також визначається масивністю бетону й пропорційний його гідралічному радіусу. У випадку використання бетонів

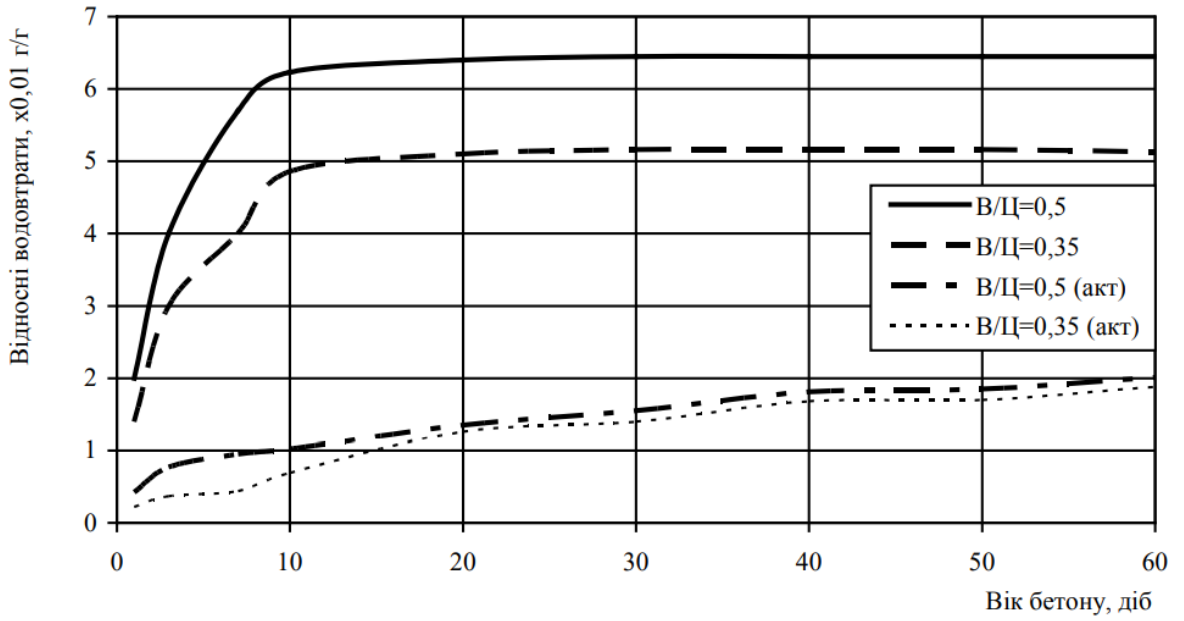


Рисунок 2.3 - Вплив складу бетону на його водовтрати при відсутності догляду

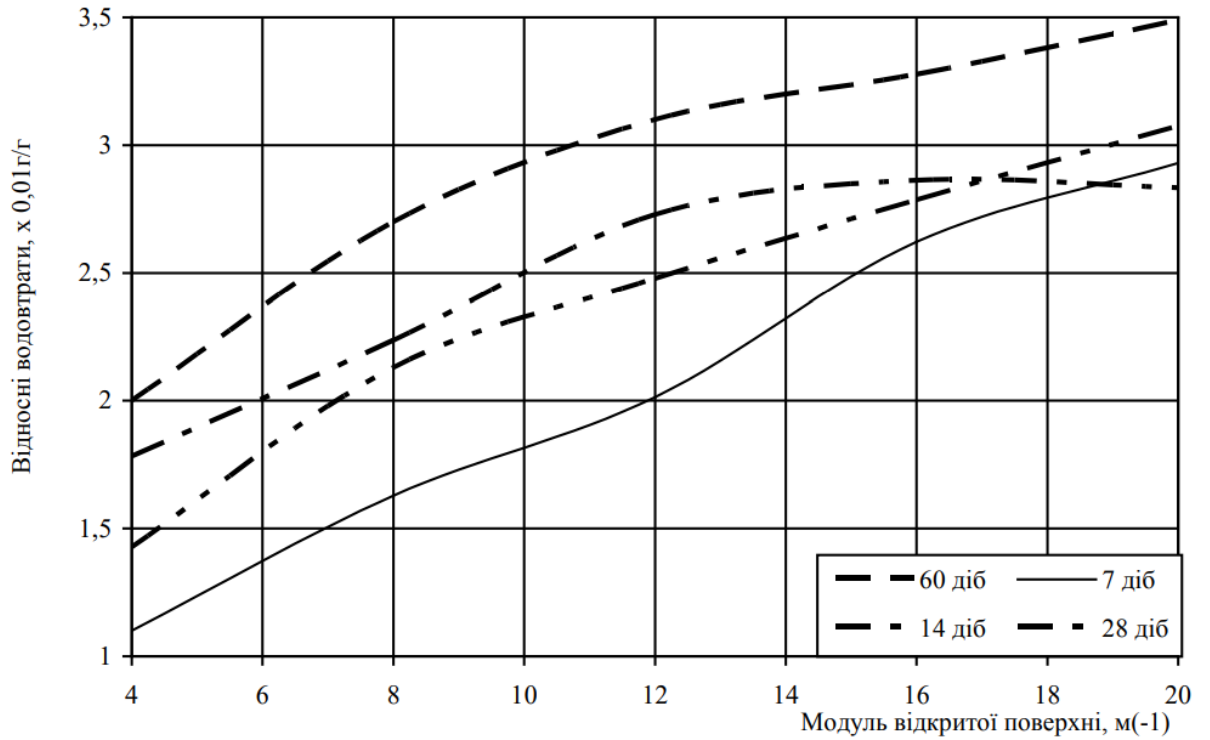


Рисунок 2.4 - Залежність водовтрат бетону на активованій в'язучій речовині від модуля відкритої поверхні (без догляду)

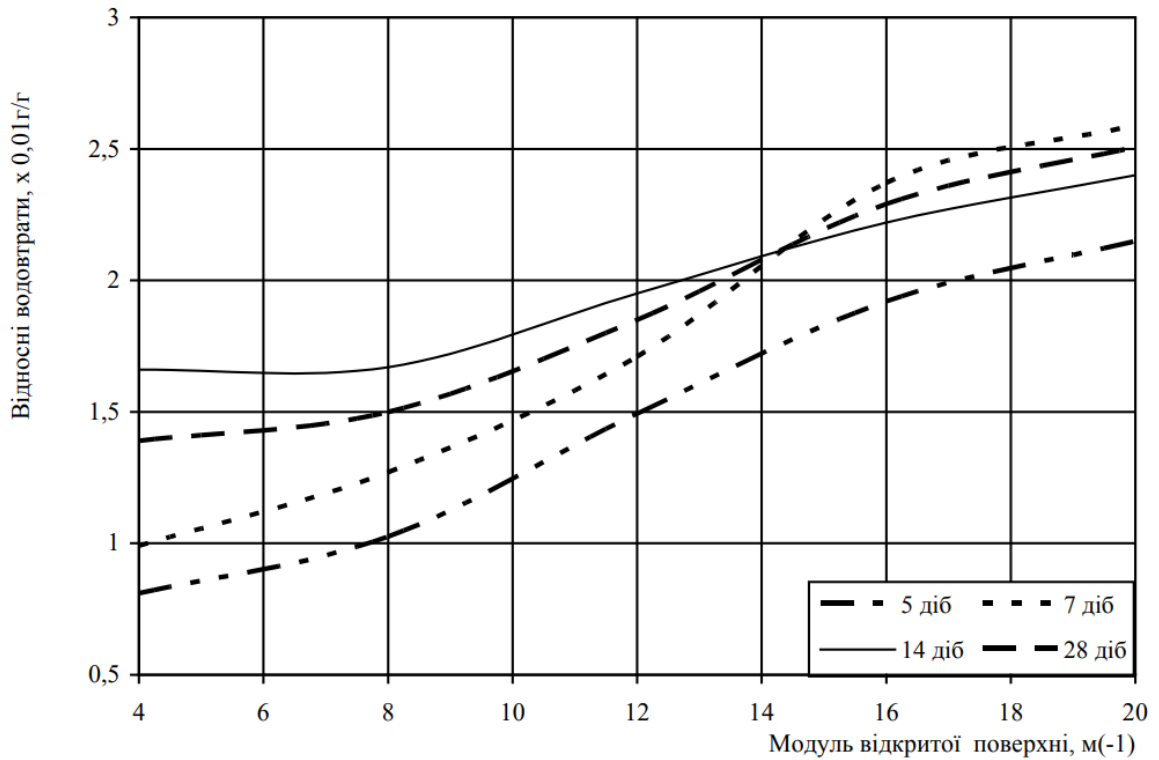


Рисунок 2.5 - Залежність водовтрат бетону на активованій в'язучій речовині від модуля відкритої поверхні (догляд 3 доби)

на активованій в'язучій речовині залежність ступеня гідратації від вказаних факторів знижується внаслідок зміни умов гідратації під час фізико-хімічної активації цементної системи. Реальний хімічний вологовміст бетону визначиться із залежності [89]:

$$U_x^{\text{гр}} = \frac{0,15}{1+x+y} \quad (2.10)$$

Отримані параметри U_0 і $U_x^{\text{гр}}$ дозволяють визначити рівень граничного фізичного вологовмісту бетону як різницю між початковою вологістю U_0 і кінцевою кількістю хімічно зв'язаної води $U_x^{\text{гр}}$:

$$U_{\phi}^{\text{пр}} = U_0 - U_x^{\text{гр}} = \frac{\frac{B}{C} - 0,15}{1+x+y} \quad (2.11)$$

У свою чергу, граничний фізичний вологовміст бетону ділиться на дві частини: рівноважну вологість U_p і граничні водовтрати бетону W_{∞} . Таким чином, граничні водовтрати бетонного елемента можна виразити як частку граничного фізичного вологовмісту бетону:

$$W_{\infty} = k_v \cdot U_{\phi}^{\text{пр}} \quad (2.12)$$

Значення коефіцієнта вологовтрат k_v залежить від цілого ряду факторів: термодинамічних умов середовища, масивності елемента, складу бетону та обраної технології бетонних робіт. Вплив цих факторів відрізняється за величиною. У той же час, спостереженнями встановлено, що бетони на активованій в'язучій речовині 2...3-місячного терміну тверднення відрізняються стабільністю щодо величини водовтрат незалежно від коливання умов навколишнього середовища. Це дозволяє виключити один з основних параметрів з розгляду й прийняти, що граничні водовтрати залежать лише від масивності споруди. Відзначене підтверджується дослідними результатами визначення відносних водовтрат бетону масивних елементів, наведеними у таблиці 2.2 і 2.3 [87].

Таблиця 2.2 - Відносні водовтрати бетону масивних елементів без догляду

Вік зразків, діб	Відносні водовтрати $W \cdot 10^{-2}$ г/г, з модулем поверхні, m^{-1}		
	$m=5$	$m=2,5$	$m=1,25$
2	0,69/0,36	0,34/0,18	0,15/0,09
7	1,60/0,46	0,80/0,24	0,44/0,14
28	3,41/0,53	2,39/0,37	1,50/0,18
60	3,78/0,56	3,30/0,48	2,50/0,24

Примітка. У чисельнику середні результати визначень для звичайного бетону, у знаменнику - для бетону на активованій в'язучій речовині. Склад бетону 1:1,92:4,33 при В/Ц=0,45.

Таблиця 2.3 - Вплив складу бетону на його водовтрати в різному віці (без догляду)

Склад бетону	В/Ц	Вік бетону, діб	Відносні водовтрати зразків, 10^{-2} г/г з модулем відкритої поверхні, m^{-1}	
			ш=20	ш=10
1:1,63:3,45	0,35	2	1,47/0,24	0,84/0,16
		7	3,35/0,28	2,18/0,24
		14	3,80/0,38	2,85/0,29
		28	3,85/0,47	3,40/0,34
1:1,65:3,85	0,43	2	2,07/0,33	1,05/0,27
		7	4,12/0,38	2,66/0,31
		14	4,72/0,49	3,67/0,44
		28	4,81/0,58	4,20/0,48
1:1,92:4,33	0,52	2	2,71/0,32	1,43/0,29
		7	5,40/0,38	3,59/0,33
		14	6,20/0,48	4,92/0,39
		28	6,29/0,53	5,51/0,47

Примітка. У таблиці наведені середні результати по трьох визначеннях. У чисельнику середні результати визначень для звичайного бетону, у знаменнику - для бетону на активованій в'язучій речовині.

Інтенсивність впливу цих факторів на W_x визначалася ймовірностно-статистичним методом (МГОА) і за результатами даних [90] отримано значення k_6 у вигляді лінійного полінома:

$$k_B = k_1 \cdot m + k_2 \cdot \frac{1}{V_3} + k_3 \cdot \frac{\tau_\partial}{\tau_\partial^{max}} \quad (2.13a)$$

де V_3 - відносний вміст в 1 м^3 бетону крупного заповнювача, $V_3=f(x, y, \varphi)$;

τ_∂ - тривалість вологісного догляду за бетоном;

τ_∂^{max} - гранична тривалість догляду, $\tau_\partial^{max} = 14$ діб.

Коефіцієнти ступеня впливу різних факторів на водовтрати бетону рівні: $k_1=1,01 \cdot 10^{-2}$; $k_2=0,347$; $k_3=-0,352$. Після елементарних перетворень залежність

для визначення коефіцієнта водовтрат представляється у вигляді:

$$k_B \frac{m}{100} + q \left(\frac{1}{V_3} - \frac{\tau_\partial}{\tau_\partial^{max}} \right) \quad (2.136)$$

де q - коефіцієнт, що залежить від кліматичних умов регіону.

Таким чином, представляється можливим робити оцінку граничних водовтрат бетонних елементів у літній період року залежно від складу бетону, масивності й обраної технології. Порівняння дослідних даних водовтрат бетону в літній період показало, що значення коефіцієнта q трохи змінюється. Наприклад, у східних рівнинних регіонах його величина збільшується до 15%, а в західних областях (передгір'я Карпат) - зменшується приблизно на 10% у порівнянні з центральними областями, де є вплив великих рік. Очікувалося, що ці значення обернено пропорційні відносної вологості повітря в районах.

За усередненими кривими відносних водовтрат бетону спеціального призначення, наведеними на рис. 2.3...2.5, можна визначити також період релаксації за залежністю

$$\tau_0 = \frac{\tau_{e\phi}}{\ln \frac{W_\infty}{W_\infty - W_\tau}} \quad (2.14)$$

де W_τ - водовтрати бетонного елемента за період часу τ .

За дослідними даними період релаксації водовтрат бетону визначається трьома факторами: щільністю бетону, масивністю елемента та відносною тривалістю вологісного догляду за бетоном.

Розглядаючи бетонний еталонний елемент одиничної масивності ($m=1$) із щільністю, що характеризується логарифмом міцності ($\lg R_0 = 1$), знаходимо граничний період релаксації водовтрат бетону:

$$\tau_0^{max} = 150 - 100 \left(- \frac{\tau_\partial}{\tau_\partial^{max}} \right) \quad (2.15)$$

Отже, період релаксації водовтрат реальних бетонних елементів масивністю m визначається зі співвідношення:

$$\tau_0 = \tau_0^{max} \frac{\lg R_0}{m} \quad (2.16)$$

де R_0 - марочна міцність бетону.

Система залежностей (2.8)...(2.16) дозволяє прогнозувати усереднені водовтрати бетонних елементів в літній період року з відносною похибкою менш 3,8%, що цілком задовольняє вимогам сучасної інженерної практики.

При вирішенні деяких завдань напруженого стану бетону від вологісноо градієнту виникає необхідність знайти розподіл фізичної вологи по глибині елементів. Розподіл фізичного вологовмісту визначається віддаленістю (координатою) шару бетону від поверхні випаровування. Криві зміни вологісного стану по глибині елемента близькі параболічним функціям [91]. У той же час, це завдання для елементів простої геометричної форми може бути вирішено використанням диференційного рівняння масопереносу (2.1) при деяких спрощуючи умовах. Особливо зручно використати залежність (2.1), представляючи її рівнянням у кінцевих різницях. У цьому випадку точність рішення визначається вибором величини проміжків часу Δt й товщиною шарів бетону. Рівняння (2.1) у кінцевих різницях має вигляд [91]:

$$U_{(\tau+\Delta\tau)_n} - U_{t_n} = 2k \frac{\Delta\tau}{(\Delta x)^2} \left(\frac{U_{(n+1)\tau} + U_{(n-1)\tau}}{2} - U_{n\tau} \right) \quad (2.17)$$

де n - номер смуги бетонного елемента.

Це ж завдання можна вирішити приблизно, якщо прийняти, що водовміст поверхневого шару в початковий проміжок часу приблизно дорівнює граничному водовмісту бетонного елемента, тобто водовтрати поверхневого шару близькі величині водовтрат бетону в рівноважному стані ($W_{noe} = W_{\infty}$) [92]. При цьому в початковий період вологовміст поверхневого шару складається з фізичної вологи, що поступово замінюється хімічно зв'язаною вологою.

Гранично вологовміст поверхневого шару складається з рівноважної й хімічно зв'язаної вологи. Таке припущення дозволяє досить просто представити звичайний параболічний розподіл вологи по глибині елемента, використовуючи графоаналітичний метод [93]. Система отриманих залежностей дозволяє оцінити гігрометричний стан у літній період року.

2.2 Реологічні властивості бетонних сумішей для відновлення масивних транспортних споруд

Необхідність дослідження реологічних властивостей бетонних сумішей, що застосовуються для ремонту та відновлення транспортних споруд, викликана тим, що при проведенні ремонтних робіт в літній період року істотно змінюються водовміст і рухливість сумішей, призначених для використання без призупинення експлуатації споруди.

Дослідження реологічних властивостей бетонних сумішей здійснювалося на сумішах рухливістю 10...15 см. Дослідні значення легкоукладальності трьох серій бетонних сумішей наведені у табл. 2.4...2.6. Усього було проаналізовано 10 серій випробувань по 12 замісів у кожній серії. Зразки виготовлялися з використанням портландцементу М 400 ВАТ «Балцем» та кварцового піску з $M_{кр}=2,0$ (таблиця 2.4); сульфатостійкого портландцементу М 400 ВАТ «Балцем» та суміші гранітного відсіву та річкового кварцового піску з $M_{кр}=2,3$ (див. таблицю 2.5, 2.6). Виділені склади бетону з активованою цементною системою.

Сукупність отриманих експериментальних даних дозволила, використовуючи метод найменших квадратів, установити границю розшарування бетонних сумішей.

Застосування фізико-хімічної активації цементної системи забезпечує одержання рухливих бетонних сумішей зі зниженням витрати цементу на 1 м^3 бетону на 35...40%.

Одержати рухливі бетонні суміші на активованій в'язучій речовині можливо при різному насиченні суміші крупним заповнювачем з одночасним зниженням витрати в'язучої речовини.

Таблиця 2.4 - Дослідні характеристики бетонних сумішей для відновлювальних робіт (портландцемент М 400 ВАТ «Балцем», річковий кварцовий пісок, ОК=12 см)

Склад бетону, кг/м ³				Характеристики бетонної суміші		
цемент	вода	пісок	щебінь	В/Ц	х=П/Ц	у=Щ/Ц
319	192	793	993	0,6	2,57	3,11
341	191	575	1193	0,56	1,82	3,50
363	204	734	986	0,56	2,18	2,70
432	215	700	920	0,50	1,87	2,13
415	207	704	952	0,50	1,96	2,29
387	192	714	1006	0,50	2,13	2,60
413	194	700	992	0,47	2,02	2,41
439	196	684	987	0,45	1,91	2,23

Таблиця 2.5 - Дослідні характеристики бетонних сумішей для відновлювальних робіт (сульфатостійкий портландцемент М 400 ВАТ «Балцем», суміш гранітного відсіву та річкового кварцового піску, ОК=12 см)

Склад бетону, кг/м ³				Характеристики бетонної суміші		
цемент	вода	пісок	щебінь	В/Ц	х=П/Ц	у=Щ/Ц
330	209	708	1003	0,63	2,13	3,04
353	223	664	987	0,63	1,86	2,80
350	207	515	1177	0,59	1,52	3,36
375	209	643	1024	0,56	1,84	2,73
433	228	620	943	0,53	1,59	2,18
400	210	628	1010	0,53	1,74	2,52
426	212	613	996	0,50	1,65	2,34
454	214	597	981	0,47	1,55	2,16

Таблиця 2.6 - Дослідні характеристики бетонних сумішей для відновлювальних робіт

Склад бетону, кг/м ³				Характеристики бетонної суміші			
цемент	вода	пісок	щебінь	В/Ц	x=П/Ц	y=Щ/Ц	ОК, см
324	205	775	968	0,63	2,38	2,99	16
302	191	772	1029	0,63	2,55	3,41	12
345	205	724	1000	0,59	2,17	2,90	16
324	192	764	1013	0,59	2,44	3,12	12
369	206	562	1136	0,56	1,64	3,08	16
344	191	712	1047	0,56	2,23	3,05	13
367	193	699	1034	0,53	2,12	2,82	12
388	193	564	1149	0,50	1,67	2,96	12

Легкоукладальність таких бетонних сумішей має стабільний характер у діапазоні використаних складів. Це дозволяє стверджувати, що фізико-хімічна активація сприяє одержанню бетонних сумішей, які не піддаються розшаруванню. На відміну від цього, звичайні бетонні суміші характеризувалися явними ознаками розшарування. При цьому розшаруванню при ОК=15 см піддавався також склад з мінімальною витратою цементу.

Використання активованої в'язучої речовини дозволяє не тільки значно знизити витрату цементу, але також переміщує границю розшаруваності у бік складів з більшим насиченням крупним заповнювачем. Отже, фізико-хімічна активація цементної системи забезпечує одержання бетонних сумішей оптимальних складів, характерних мінімальною витратою цементу й оптимальним насиченням їх крупним заповнювачем.

Найважливішою технологічною характеристикою бетонних сумішей для ремонту та відновлення масивних транспортних споруд є здатність зберігати однорідність і нерозшаровуваність протягом усього технологічного циклу провадження робіт. При виконанні таких робіт виникає необхідність використання рухливих бетонних сумішей. Звичайно приготування таких бетонних сумішей здійснюється з високою витратою води, що робить їх особливо схи-

льними до розшаровування. Як довели дослідження, використання активованих цементних систем сприяє підвищенню водоутримуючої здатності бетонних сумішей.

При визначенні розшаровуваності бетонної суміші використовували два методи. Один з них заснований на переміщенні центра ваги призми, що вертикально формується. Дві стандартні форми розміром 10x10x30 см заповнювалися бетонною сумішшю одного складу. Ущільнення здійснювали за допомогою струшуючого столика. Через 1 добу зразки розформували й уклали на прилад для визначення центра ваги балочок на вістрі ножа приладу. По переміщенню центра ваги й відповідно переміщенню ножа визначається ступінь розшаровуваності суміші. Другий метод визначення розшаровуваності бетонної суміші полягає у визначенні розшарування при переміщенні суміші від бетонозмішувача до форми. Розшаровування суміші оцінювали, зіставляючи фактичні склади суміші і їх неоднорідність до проведення якої-небудь технологічної операції (I ділянка) і після її проведення (II ділянка). На кожній ділянці відбирали 3 проби суміші об'ємом 7 л кожна, з яких відбирали по 2 л суміші, усереднювали й ділили на 2 частини по 1 л. Одну пробу зважували, сушили до постійної маси й знову зважували, визначаючи втрати маси при сушінні. Іншу пробу піддавали мокрому розсіву на ситах з отворами 5 і 0,16 мм, залишки на ситах сушили й зважували. Масу води в першій пробі визначали, додаючи втрату води при сушінні проби (для портландцементу прийнято 0,17% від маси цементу, взятої за номінальним складом суміші). Масу води в другій пробі визначали по отриманій масі води в першій пробі - пропорційно масі другої проби. Масу піску в другій пробі визначали, додаючи до маси висушеного залишку на ситі з отворами 0,16 мм втрату піску й щебеню через сито при мокрому розсіві бетонної суміші. Величини втрат піску й щебеню визначали окремими дослідженнями на пробах піску й щебеню. Масу щебеню у другій пробі вважали рівній масі сухого залишку на ситі з отворами 5 мм (сюди входить маса фракцій більше 5 мм у піску). Віднімаючи з маси другої проби отримані величини В, П, Щ, одержували масу цементу. Така методика дозволяє визначити фактичний склад проби суміші з точністю по воді $\pm 1,5\%$, по піску й

щебеню $\pm 2\%$, по цементу $\pm 2,5\%$. Після відбору двох літрових проб із об'ємів, що залишилися, відбирали дві проби для виміру осідання конусу, потім із усього об'єму бетонної суміші в трьох пробах виготовляли 10 кубів з ребром 10 см для визначення міцності [94].

Для рухливих бетонних сумішей, що використовуються для відновлення транспортних споруд, небезпечним є розвиток водовідділення. При замішуванні звичайної бетонної суміші в процесі перемішування дрібні флокули цементу не дезагрегуються, а більші розпадаються на окремі мікрооб'єми, тому незалежно від концентрації твердої фази цементне тісто слід розглядати як неоднорідну дисперговану систему, що складається з мікроагрегатів і окремих часток, зв'язаних силами Ван-дер-Ваальса. Таке сполучення різних за крупністю мікро агрегатів, розділених тонкими прошарками дисперсійного середовища, призводить до утворення коагуляційної структури.

Здатність цементного тіста утримувати певний об'єм води визначається інтенсивністю взаємодії між частками - чим менше їх розмір, щільніше вони упаковані й тонші водні оболонки, тим менше структурні чарунки між гідратованими частками цементу й міцніше утримується в них вода. Якщо частки розсунуті так, що вони вже не здатні взаємодіяти одна з одною, то зв'язність структури порушується, і цементний гель починає відокремлювати воду. Роз'єднані частки й цілі агрегати з них, перебуваючи спочатку у зваженому стані, постійно випадають у вигляді осаду, витісняючи воду, шар якої над осадом тим тонше, чим більше води замішування (понад оптимальну кількість) утримується в цементному гелі. За абсолютною величиною водоутримуюча здатність цементу зростає зі збільшенням оптимальної водопотреби, яка непрямою мірою може бути оцінена за нормальним водоутриманням. Граничне значення В/Ц характеризує водоутримуючу здатність цементу. З урахуванням транспортування без ефекту вібрування водоутримуюча здатність активованої цементної системи становить $V/C = 1,3$ [В/Ц].

Водоутримуюча здатність бетонної суміші в значній мірі залежить від вмісту й властивостей заповнювачів, особливо дрібного. Наприклад, дослідженнями [95], проведеними на піску крупністю 0,8 мм і щебені фракції 10...20

мм (склад 1:2:3), встановлено, що досягнення пластичності й зв'язності бетонної суміші можливо тільки за умови вмісту часток менш 0,5 мм у кількості не менш 37%. При цьому 50% таких часток повинно проходити через сито 4000 отв/см². Тому оптимальний зерновий склад слід встановлювати з урахуванням загальної гранулометрії (включаючи цемент) залежно від нормальної густоти [В/Ц] цементу й водоцементного відношення.

Дослідження, проведені на пластичних бетонних сумішах з використанням фракціонованих заповнювачів і активованої цементної системи, повністю підтвердили положення про наявність взаємозв'язку між гранулометричним складом і водоутримуючою здатністю суміші. На фракціонованих заповнювачах без урахування транспортування величина водоцементного фактора складала $V/C=1,96$ [В/Ц].

У роботі [96] відзначається існування певного зв'язку між водоутримуючою здатністю цементного тіста й видом і кількістю хімічної добавки, що вводять у тісто.

Експерименти, пов'язані з визначенням водоутримуючої здатності, базуються на урахуванні вільно витікаючої води з ущільненого у формі цементного тіста. При цьому три формочки без дна розміром 10x10x10 см встановлюються одна на одну. Із цементного тіста, що накладається у верхню форму, через пісок у двох нижніх формах забезпечується вільне стікання води. Через добу форми розкриваються, і за різницею маси визначається кінцеве водоцементне відношення й кількість води, що витікла. Залежності водовідділення бетонних сумішей від складу органо-мінерального комплексу наведені на рис. 2.6 [97]. При цьому дослідження виконані при різних значеннях водоцементного відношення від 0,45 до 0,60. При високому та низькому зна-

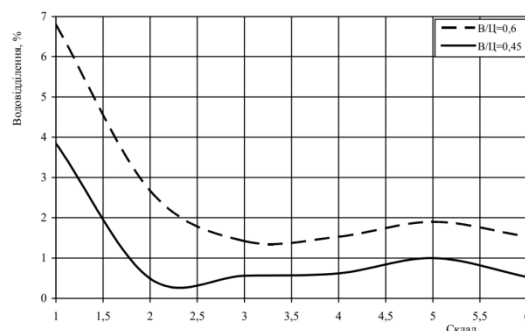


Рисунок 2.6. Залежність водовідділення бетонної суміші від складу ОМК

ченнях В/Ц видно, що у звичайних бетонних сумішах має місце підвищення водовідділення суміші. Фізико-хімічна активація цементної системи призводить до зниження водовідділення у 3...4 рази в залежності від складу ОМК.

Визначення коефіцієнта водовідділення здійснювалося за методикою [97], заснованою на вільному зсіданні 25%-ної цементно-водної суспензії. Водоутримуюча здатність характеризується коефіцієнтом ступеня водовідділення, що обчислюють за формулою

$$K = \frac{H-h}{H} \cdot 100 \quad (2.18)$$

де H - первинний об'єм цементно-водної суспензії;

h - об'єм твердої фази цементно-водної суспензії, що стабілізувалася, у даний термін.

Спостереження провадилися до повної стабілізації осаду, термін спостережень становив 7 діб. Значення коефіцієнта водовідділення для сульфатостійкого портландцементу показані на рисунку 2.7. Активована цементна система незалежно від складу органо-мінерального комплексу характеризується стабільною водоутримуючою здатністю внаслідок підвищення в'язучого потенціалу цементу.

Технологічні властивості бетонної суміші у значній мірі визначаються її життєздатністю за певний проміжок часу. На життєздатність сумішей значний вплив чинять умови навколишнього середовища. У лабораторних умовах зміна рухливості суміші в часі визначалася шляхом виміру осідання конуса. Інтенсивність зміни ОК залежала від умов бетонування й виду проведених дослідів. Результати дослідів представлені в таблиці 2.7.

Зміна легкоукладальності суміші в часі поділяється на три основних періоди: початковий - індуктивний період утворення пластичної суміші;

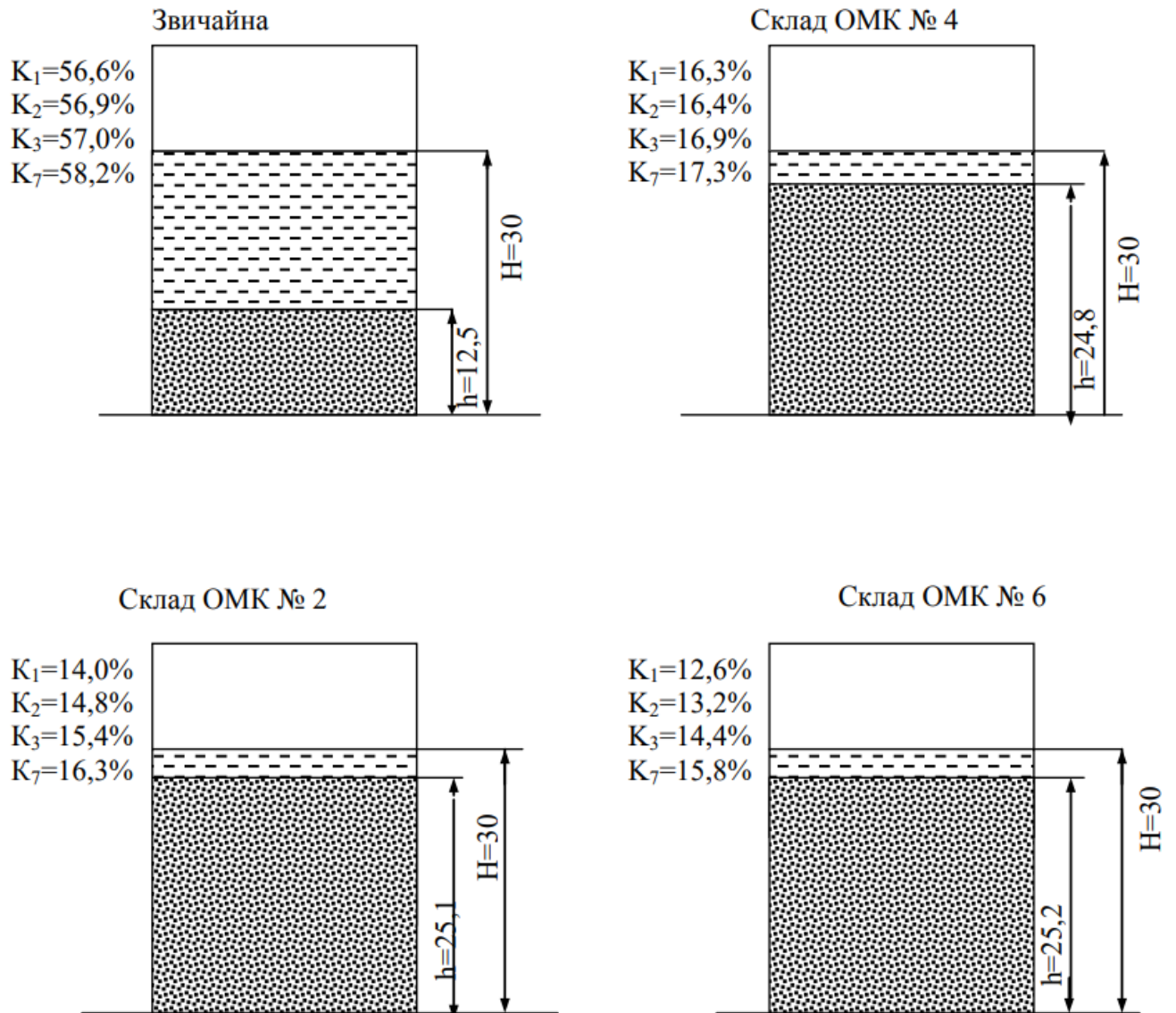


Рисунок 2.7 - Вплив фізико-хімічної активації на водоутримуючу здатність цементної суспензії сульфатостійкого портландцементу М 400: $K_1=1$ доба; $K_2=2$ доби; $K_3=3$ доби; $K_7=7$ діб;

Таблиця 2.7 - Вплив часу витримування бетонної суміші на її рухливість (початкове осідання конуса 15 см)

Вид суміші	Умови витримування	Рухливість бетонної суміші, см, через						
		15 хв	30 хв	45 хв	1 год	1 год 15 хв	1 год 30 хв	1 год 45 хв
Звичайна	лабораторія	12	10	7	6	4	3	3
	кліматична камера	12	8	5	4	3	2	2
На активованій в'язучій речовині	лабораторія	15	15	14	13	13	12	12
	кліматична камера	15	13	13	12	11	10	10

період експонентної зміни консистенції суміші; період структуроутворення бетону.

Останній період характеризується лавиноподібним переходом суміші із пластичного стану у твердий. Цей період пов'язаний з формуванням просторового каркаса гідратних новоутворень, зміцненням і ущільненням їхніх зв'язків.

Зміна легкоукладальності в період пластичного стану суміші можна оцінити, використовуючи диференційне рівняння стану бетонної суміші залежно від її зрілості

$$\frac{dG}{dN} = K_{\tau} \frac{G}{N_{w/q}} \quad (2.19)$$

Звідси рівняння зміни консистенції бетонної суміші в часі прийме вигляд:

$$G_{\tau} = G \cdot \exp\left(K_{\tau} \frac{N_w}{q}\right) \quad (2.20)$$

де N_w - показник зрілості бетонної суміші;

q - відносний водоцементний фактор;

G - початковий показник жорсткості бетонної суміші.

Показник зрілості бетонної суміші N визначається з виразу

$$N_w = \tau \left(\frac{T+10}{U_\tau} \right) \quad (2.21)$$

де τ - час витримки бетонної суміші;

T - температура бетонної суміші

U_τ - водовміст бетонної суміші до кінця даного періоду в % від початкової величини U_n .

Величина коефіцієнта K_0 для різних умов визначена на підставі дослідних даних таблиця 2.7. Наприклад, для бетонної суміші на активованій в'язучій речовині $K_0=1,17...1,24$ (нормальні умови), а в літніх умовах $K_0=1,20...1,27$.

Таким чином, урахування встановлених технологічних факторів при проектуванні рухливих бетонних сумішей, що застосовуються для відновлення транспортних споруд в літній період року, дозволяє управляти властивостями бетонів.

2.3 Вплив гігromетричного стану на власні деформації бетону транспортних споруд

Як відомо, об'ємні усадкові деформації бетону діляться на дві складові - пластичну й пружну усадку [98].

Незважаючи на численні дослідження, складний характер усадки бетону до кінця не вивчено. Однак безсумнівно, що причиною усадочних деформацій є процеси гідратації й кристалізації в'язучої речовини при зміні гігromетричного стану бетону. Численні пояснення природи й механізму усадки можна віднести до однієї із двох груп. На думку прихильників першої групи теорій і гіпотез, усадка залежить від фізико-хімічних процесів, що супроводжують тужавіння й

тверднення цементного тіста [99]. У початковий період цементна складова являє собою гель із включенням зерен негідратованого цементу. У період тверднення гель ущільнюється за рахунок зневоднення шляхом випаровування й триваючого відбору вологи зернами цементу, що вступає в реакцію. З іншого боку, окремі продукти гідратації клінкерних мінералів поступово переходять із колоїдного стану в більш стійкий кристалічний із частковим збільшенням об'єму. Кристалоутворення пронизують масу гелю й, зростаючись між собою, утворюють твердий кістяк цементного каменя. Ці процеси викликають у бетоні, що твердіє, об'ємні зміни. При цьому вирішальне значення в зневоднюванні гелю й розвитку усадки мають водовтрати в навколишнє середовище. Отже, в літній період року особливо інтенсивно протікає усадка бетону [100].

Прихильники другої групи теорій і гіпотез пояснюють усадку капілярними явищами, що мають місце в мікропорах цементного каменя внаслідок зміни його вологості [100]. При втраті води з мікрощілин і капілярів важливу роль починають грати меніски, що утворюються на границі розділу газоподібної й рідкої фаз. Як вперше показано [101], сили стягування окремих кристалогідратів цементного каменя можуть досягати значних величин, здатних деформувати бетонний елемент.

Обидві групи теорій усадки не суперечать одна одній й не виключають одна одну, а практично пояснюють явище усадки. У світлі сучасних фізико-хімічних уявлень фізична природа усадки ґрунтується на розвитку структури цементного каменя, що складається із кристалічного зростка з гелевою складовою у міжкристалічному просторі [102]. У період тужавіння цементної матриці бетону усадка виникає через втрату вільної води гелевою складовою цементного каменя. Втрата води відбувається внаслідок випаровування й відсмоктування у гідратований шар на поверхні цементних зерен для подальшої гідратації клінкерних мінералів. При відсмоктуванні води в дифузійний шар усадка цементної матриці бетону визначається зменшенням дійсного об'єму новоутворень.

Як показали дослідження [96, 97], в літній період року можливий розвиток усадкових деформацій у незатверділому бетоні. Такі деформації до тужа-

віння є пластичною усадкою, тому що вони розвиваються в пластичному матеріалі. При цьому пластична усадка може бути настільки значною, що вже в першу добу призводить до утворення видимих тріщин з розкриттям до 1 ...1,5 мм.

Перевищення швидкості водовтрат бетону в навколишнє середовище над швидкістю підйому вологи із глибинних шарів у зону випаровування визначає умови пластичного тріщиноутворення бетону. Період вирівнювання цих процесів характеризується зникненням блиску з поверхні бетону, що твердне. При триваючому зневодненні поверхневі шари бетону не в змозі витримувати швидкі зміни власного об'єму, й при протидії цьому з боку глибинних шарів починається пластичне тріщиноутворення. Початкова усадка бетону з моменту його замішування до 2-добового віку досліджувалася за допомогою оптичного компаратора. Відформовані зразки разом з формою ставилися на предметний стіл приладу. По спеціальних мітках спостерігалася зміна лінійних розмірів зразків. Крім усадки, визначалися загальні й пошарові водовтрати бетону. На рис. 2.8 показана зміна величини поверхневих деформацій бетону складу 1:1,3:4,1 з В/Ц=0,42 залежно від умов тверднення. Найбільша усадка спостерігалася на зразках звичайного бетону, що тверднули у кліматичній камері при температурі 40°C і вологості 37%, яка склала у 2-добовому віці 3,51 мм/м і перевищила звичайні величини усадки в кілька разів. У нормальних умовах тверднення усадка зразків бетону в цьому ж віці перебувала в межах 2,44...2,58 мм/м. Величина поверхневої усадки знижувалася зі збільшенням вологості середовища тверднення. Більше того, в умовах, близьких до нормальних, усадка звичайного бетону після первісного розвитку починає зменшуватися, тобто бетон набухає. Це пов'язано з адсорбцією тверднучим бетоном вологи з навколишнього насиченого середовища.

Форми кривих усадки зразків бетону на активованій в'язучій речовині в різних умовах тверднення мають однотипний обрис, на відміну від звичайного бетону, який відрізняється високими значеннями усадки (див. рисунок 2.8).

Залежність пластичної усадки зразків від їхньої висоти досліджувалася на

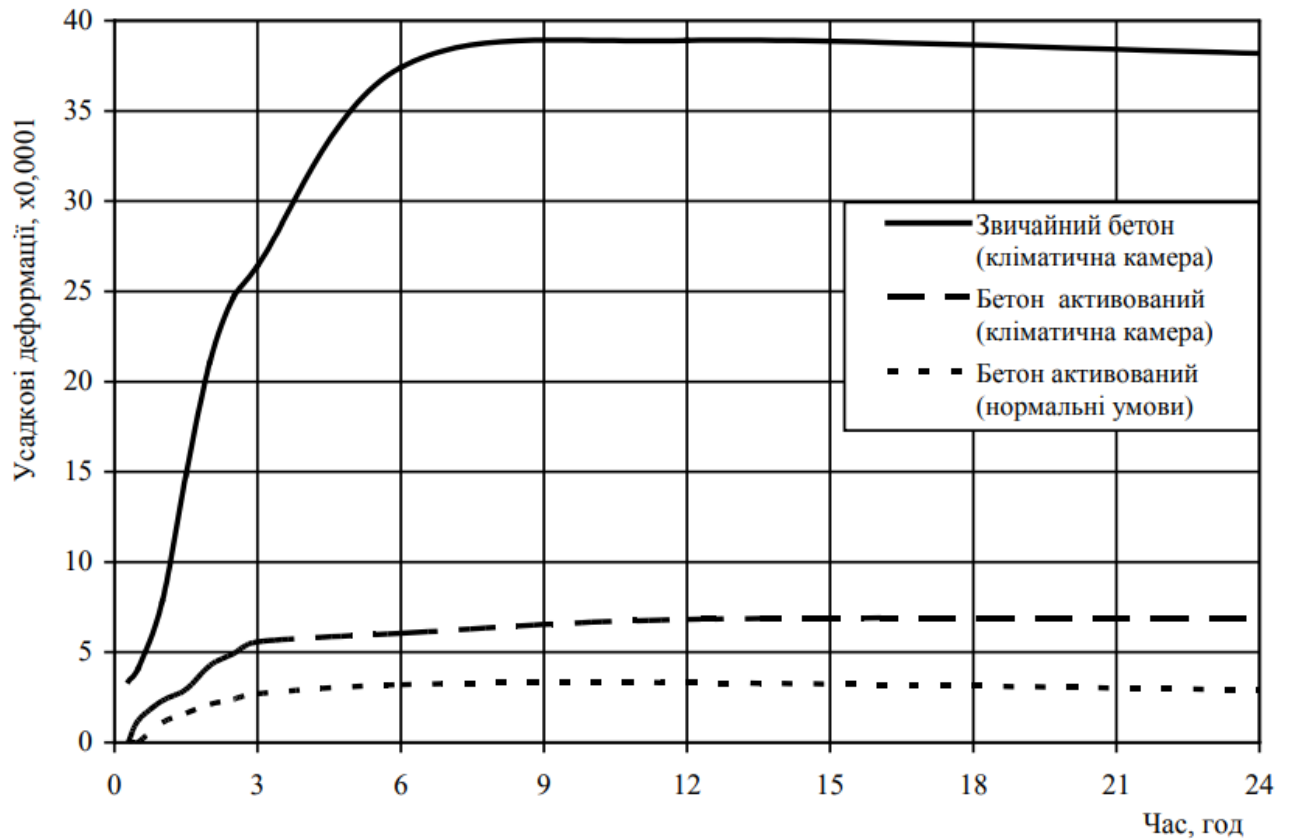


Рисунок 2.8 - Пластична усадка бетону у різних умовах тверднення

зразках-кубах з ребром 5, 7 і 10 см. При цьому встановлено, що обрис кривих усадки зразків звичайного бетону аналогічний, змінюється лише тривалість періодів і загальна величина усадки. Зі зменшенням розмірів зразків початковий період усадки їх скорочується, а швидкість усадки в другому періоді росте.

Після початку тужавіння швидкість усадки звичайного бетону збільшується залежно від умов тверднення. При температурі 40°C і вологості 37% швидкість усадки пропорційна логарифму часу в цей період. При цьому усереднена швидкість усадки дещо нижче швидкості першого періоду й дорівнює 0,371 мм/мтод. Швидкість усадки істотно знижується після завершення періоду тужавіння бетону й придбання їм значної міцності, причому встановлено, що зниження швидкості обернено пропорційно вологості середовища тверднення. У цілому пластична усадка зразків звичайного бетону настільки велика, що щілини між зразками й формою видні неозброєним оком. Що стосується зразків

бетону на активованій в'язучій речовині, величини усадки на протязі терміну вимірювань знаходяться в межах 0,028...0,034 мм/м год. Це дозволяє зробити висновок про можливість використання бетону на активованій в'язучій речовині для ремонту та відновлення транспортних споруд незалежно від пори року без істотної зміни деформаційних характеристик. Крім того, можна скоротити тривалість вологісного догляду за бетоном, а в деяких випадках зовсім виключити цю технологічну операцію, що дає можливість знизити собівартість ремонтно-відновлювальних робіт.

2.4 Взаємозалежність пружної усадки й вологісного стану бетону

У початковий період тверднення цементної матриці бетону утворюються перші кристали, що пронизують цементний камінь просторовими ґратками, що перешкоджає розвитку усадки. Згодом кристали зміцнюються, і усадка цементного каменя значною мірою залежить від деформаційної здатності кристалічного зростка. Вільна вода, що випаровується із цементного каменя до терміну придбання кристалічним зростком достатньої міцності, не викликає усадку бетону. Це призводить до короткочасної затримки усадки. Затримку в розвитку усадочних деформацій відзначав С.В. Александровський [132].

Після випаровування вільної води й відсмоктування її в дифузний шар субмікрокристали віддають у навколишнє середовище частину своєї плівкової води й, зближаючись, викликають усадку структурної складової в цілому. У цементному камені, що твердіє, виникають власні напруження. Кристалічний зросток, перешкоджаючи розвитку усадки, витримує всебічний стиск, а гелева складова, що його заповнює, - всебічний розтяг. Усадка загасає в міру віддачі плівкової води й необоротного старіння гелю.

Викладені положення визначили методику визначення усадочних деформацій бетону на активованій в'язучій речовині в літній період року. Усадка бетонних зразків визначалася паралельно з визначенням гігрометричного

стану бетону на зразках-близнюках. Цим досягнута адекватність впливу навколишнього середовища на гігрометрію й вологісні деформації бетону.

Як відлікова база приймалися бетонні зразки у віці, рівному $0,7\tau_d$ (3 доби для $\tau_d = 5$ діб і 2 доби для $\tau_d = 3$ доби), причому в цьому віці втрати маси не спостерігалися. При відсутності догляду в якості вихідної приймалася довжина зразка в добовому віці. Характерні усадочні деформації наведені у таблиці 2.8, де також зіставлені водовтрати і усадочні деформації бетонних елементів різної масивності (склад 1:1,92:4,33 при $V/C=0,45$).

Із зіставлення водовтрат бетону на активованій в'язучій речовині та його усадки в літній період року без догляду спостерігається повна ідентичність досліджуваних функцій.

Встановлено, що величина граничної деформації усадки не залежить від виду бетонного елемента, а визначається початковим складом бетону й

Таблиця 2.8 - Зміна відносних водовтрат і лінійних відносних деформацій бетону залежно від тривалості догляду

Вік бетону, діб	Модуль відкритої поверхні, m^{-1}									
	m=20		m=10		m=5		m=2,5		m=1,25	
	$W \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$W \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$W \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$W \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$W \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$
Догляд 5 діб										
10	1,21	2,00	0,56	0,50	0,27	0,30	0,13	-	0,06	-
14	2,20	4,50	1,15	2,00	0,58	1,00	0,29	0,30	0,15	-
28	3,34	7,00	2,29	4,00	1,40	2,50	0,79	1,50	0,42	0,50
60	3,53	7,50	2,91	5,50	2,28	4,00	1,55	2,50	0,92	1,50
Догляд 3 доби										
7	1,94	4,00	0,97	1,50	0,48	0,30	0,24	-	0,22	-
10	2,88	6,00	1,60	3,00	0,84	1,50	0,43	0,30	0,35	-
14	3,56	8,00	2,21	4,50	1,26	2,50	0,67	1,00	0,35	0,30
28	4,17	9,50	3,25	6,50	2,24	4,50	1,36	2,50	0,75	1,00
60	4,22	9,50	3,65	7,50	3,11	6,5	2,32	4,50	1,47	2,50

величиною його граничних водовтрат [103]:

$$\varepsilon_{\infty} = \beta(W_{\infty} - \xi U_0), \quad (2.22)$$

де $\beta = 3 \cdot 10^{-2}$ - коефіцієнт лінійної усадки;

ξ - коефіцієнт критичної вологості бетону, що визначає початок об'ємних деформацій матеріалу, що висихає ($\xi \cong 0,14$).

Фізично коефіцієнт β являє собою відносну деформацію бетону (мм/мм) при зміні його відносних водовтрат на одиницю маси (г/г). У роботі [104] визначена величина відносного вологовмісту бетону. В літній період року знайдене те ж значення β , обчислене відносно водовтрат бетону. Однак на відміну від даних С.В. Александровського, в літній період року критична вологість виявилася змінною величиною, що залежить від складу бетону. При цьому середня критична вологість бетону дещо нижче визначеної в роботі [105]. Прийняті положення дозволяють визначити усадкові деформації до заданого періоду часу за рівнянням, що впливає з формули зміни водовтрат бетону в літній період року з урахуванням часу затримки деформацій усадки Δt :

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t - \tau_{\text{еф}}}{\tau_0}\right) \right] \quad (2.23)$$

Отримане рівняння, як це було показано раніше [36], за формою аналогічно залежності [106] для обчислення усадкових деформацій. Відповідно до форми рівняння (2.23) вплив різних факторів на усадку й водовтрати бетону ідентичний, а отже, вони враховуються при визначенні водовтрат матеріалу. Це добре підтверджується усередненими дослідними даними про залежність усадки від водовтрат бетону, наведеними на рис. 2.9. При цьому пряма пропорційна залежність між W і ε дотримується в різному віці (більше 2-х діб),

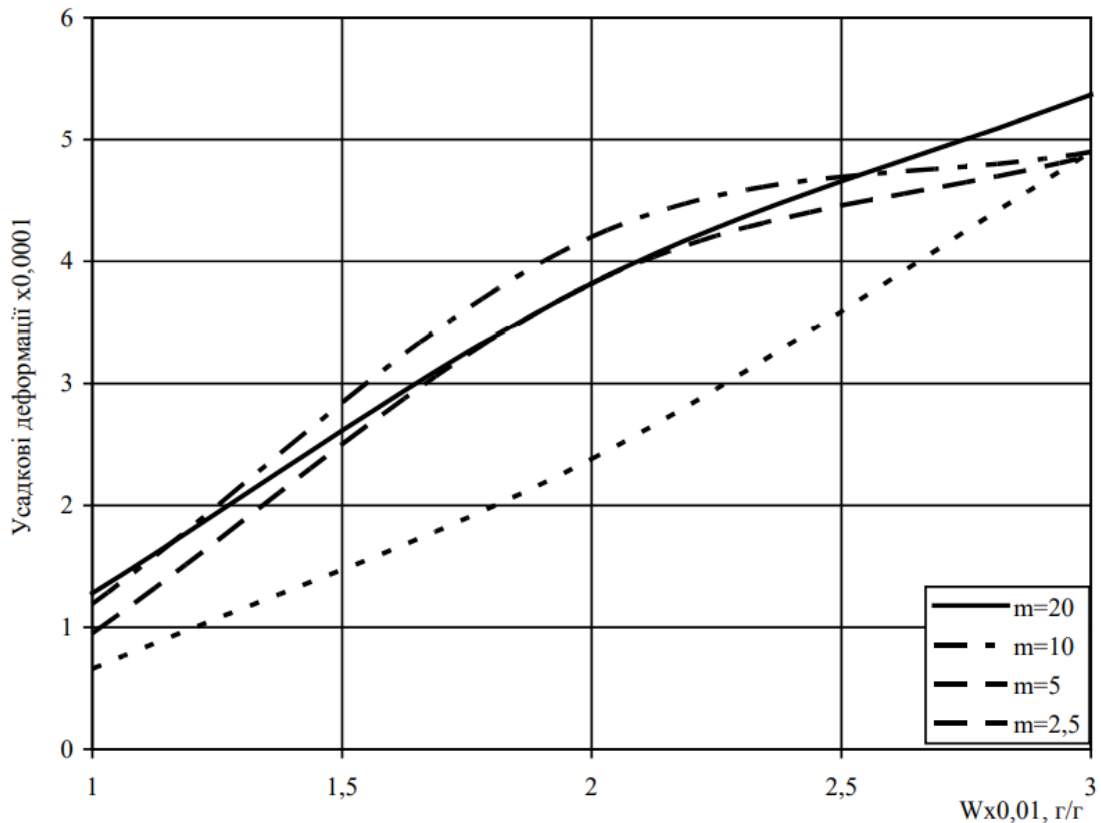


Рисунок 2.9 - Залежність усадкових деформацій від відносних водовтрат для елементів бетону на активованій в'язучій речовині різної масивності

при різній масивності елементів, змінному складі й різних видах догляду за бетоном. Це положення також підтверджується дослідними даними визначення залежності усадки бетону від вологості середовища [108].

Особливої уваги заслуговує питання залежності усадкових деформацій бетону від його складу й інтенсивності фізико-механічної активації. Р. Лерміт проаналізував зміну усадки залежно від відносного вмісту в бетоні заповнювача. Ним розроблений метод визначення усадки бетону ε_{β} за величиною вільної усадки цементного каменя $\varepsilon_{\text{ц}}$ та відносним вмістом заповнювача в бетоні. Основною причиною зменшення усадки бетону при насиченні його заповнювачами вважається опір зерен заповнювача розвитку усадкових деформацій.

У результаті зміни складу активованої цементної матриці в зоні контакту із заповнювачем, що показано в роботі [107], можливо зменшення його усадки. Усадка в цій зоні менше, а на поверхні зерна заповнювача дорівнює нулю. У бетоні на активованій цементній системі величина деформацій усадки не досягає можливих для звичайного бетону величин внаслідок збільшення кількості кристалогідратних новоутворень в об'ємі.

У ході досліджень проведено порівняння дослідних і розрахункових величин усадки для зразків бетону на активованій в'язучій речовині з модулем відкритої поверхні $m = 20 \text{ м}^{-1}$ (призми $10 \times 10 \times 40 \text{ см}$ із двома ізольованими поверхнями) у різному віці після 5-добового догляду ($k_d = 1$). Близька відповідність дослідних і розрахункових значень усадки для цементної матриці й бетону з $B/C = 0,33$ свідчить про правильність прийнятих положень, що характеризують вплив структурних параметрів на деформативність бетону для ремонту та відновлення транспортних споруд (таблиця 2.9) [85].

Слід зазначити, що значення відносного насичення бетону крупним заповнювачем визначається із залежності:

$$V = \frac{V_{\text{щ}}}{V_6} = \frac{y}{\rho_{\text{щ}} \left(\frac{1}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{x}{\rho_n} + \frac{y}{\rho_{\text{щ}}} + B/C \right)} \quad (2.24)$$

або

$$V = \frac{y}{y + \rho_{\text{щ}} \cdot \varphi_p} \quad (2.25)$$

де φ_p - вихід цементно-піщаного розчину з одиниці маси цементу,

$$\varphi_p = \frac{1}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{B}{C} + \frac{x}{\rho_n} \quad (2.26)$$

Таблиця 2.9 - Зміна усадки цементної системи й бетону з різними значеннями В/Ц

Характеристики матеріалу	Усадка ($\varepsilon_y \cdot 10^3$) у віці, діб					
	7		14		28	
	дослідна	розрахункова	дослідна	розрахункова	дослідна	розрахункова
Активована цементна система, В/Ц=0,32	1,2	1,1	1,5	1,6	1,7	1,7
Активована цементна система, В/Ц=0,38	1,5	1,6	2,1	2,5	2,3	2,6
Бетон 1:1,1:2,43; В/Ц=0,4	0,63	0,63	0,71	0,8	0,83	0,83
Бетон 1:1,1:2,43; В/Ц=0,46	0,64	0,65	0,78	0,82	0,86	0,84

Таким чином, у світлі нових положень про об'ємні вологісні деформації бетону [109] слід вважати вологісний режим навколишнього середовища основним фактором, що впливає на величину й інтенсивність усадкових деформацій бетону. Усадка бетону відбувається за рахунок усадки цементної матриці, що супроводжується зміною його пористості. При усадкових деформаціях пористість гелю прагне до зменшення, якщо при цьому не розвивається тріщиноутворення. При набряканні гелю вода, що заповнює пори, призводить до розклинюючої дії й збільшення об'єму бетону. У бетоні на активованій цементній системі усадкові деформації у залежності від масивності елементів споруд в 1,8...2,9 рази менші внаслідок значного підвищення в'язучого потенціалу цементу. Крім того, в активованій цементній системі змінюється порядок гідратації клінкерних мінералів, що сприяє формуванню міцної просторової структури цементної матриці у ранній термін тверднення.

Основні явища усадки та вплив на них різних факторів можна пояснити зменшенням пористості активованої цементної матриці бетону. Інші фактори, наприклад, вид в'язучої речовини, тонкість його помелу, порода заповнювачів мають менше значення. Вплив температурного фактора на усадкові деформації на порядок нижче, ніж вплив вологості.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ НА АКТИВОВАНІЙ В'ЯЖУЧІЙ РЕЧОВИНІ

3.1. Експлуатаційні властивості контактного шару нового і старого бетону

Причиною порушення монолітної структури конструкції при відновленні споруд спеціального призначення є недостатня міцність зчеплення ремонтного шару з матеріалом поверхні нанесення. Міцне зчеплення нового бетону з поверхнею, що ремонтується, має вирішальне значення для якісного виконання ремонтних і відбудовних робіт, а також міцності швів і стиків у спорудах.

Для забезпечення міцного зчеплення необхідні дві умови: здатність малого об'єму або малої товщини шару бетону набирати належну міцність; висока якість поверхні в місці контакту нового бетону зі старим. Усадка й рівна поверхня бетону не є основними причинами, що порушують міцне зчеплення нового бетону з поверхнею нанесення.

Дотримання наведених двох основних умов залежить від ряду фізико-хімічних факторів. Основним фактором, що чинить негативний вплив на перебіг процесів гідратації в'язучої речовини в тонкому шарі нового бетону, є видалення з нього води шляхом випаровування з поверхні й внаслідок водопоглинання бетонною поверхнею споруди. Найбільш сприятливі умови для перебігу процесів гідратації в'язучої речовини в тонкому ремонтному шарі бетону створюються при зменшенні тривалості випаровування й водопоглинання, а також при зменшенні величини цих факторів. Такі умови створюються при застосуванні в складі бетонної суміші активованої цементної системи. Така суміш характеризується високою водоутримуючою здатністю, а також скороченням термінів тужавіння й тверднення. Введенням органічного мінерального комплексу у процесі фізико-хімічної активації цементної сис-

теми створюються передумови для формування щільної структури цементної матриці бетону. Цей факт також сприяє підвищенню водонепроникності ремонтного шару. Крім того, як встановлено дослідженнями (р. 4), бетонне покриття не вимагає ретельного догляду.

Дослідженню контактної зони при твердненні звичайних бетонів у нормальних умовах присвячено не багато робіт. Особливо нечисленні дослідження в останнє десятиліття, у тому числі й в Україні. Наприклад, питання розвитку напружень у зоні контакту розглядаються у відносно ранніх роботах [110]. Вплив температурного фактора на формування контактної зони в процесі тверднення бетону в літературі висвітлено дуже мало.

Недостатньо уваги також приділяється дослідженням впливу стану відновлюваної поверхні на міцність зчеплення нового бетону зі старим. Контроль стану поверхні може бути здійснений шляхом визначення середньої висоти елементів нерівностей Δ , наявних на поверхні. Крім мікронерівностей, що характеризують власне шорсткість поверхні, на ній можуть бути розташовані також більші нерівності у вигляді хвилястості й макронерівностей. Висота хвилястості визначається вимірюванням зазору між поверхнею й прикладеною до неї контрольною лінійкою довжиною 1 м.

Оцінка якості поверхні при проведенні ремонтних і відбудовних робіт здійснюється за допомогою еталонів шорсткості [111]. Візуальне порівняння підлягаючої оцінці поверхні з еталоном шорсткості дає можливість у виробничих умовах швидко й з достатньою точністю визначити якість цієї поверхні.

Відповідно до еталонів стан поверхні представляється в такий спосіб. Шорсткість першої категорії - найбільш гладка поверхня, отримана після механічної обробки із зачищенням, $\Delta = 0,01 \dots 0,1$ мм. Шорсткість другої категорії - поверхня, отримана після очищення піскоструминним апаратом, $\Delta = 0,2 \dots 0,4$ мм. Шорсткість третьої категорії - поверхня, отримана після очищення металевою щіткою, $\Delta = 0,4 \dots 0,8$ мм. Шорсткість четвертої категорії - відносно гладка поверхня, $\Delta = 1,0 \dots 1,5$ мм. Шорсткість п'ятої категорії - менш гладка поверхня, $\Delta = 1,5 \dots 2$ мм. Шорсткість шостої категорії - більш шорсткувата поверхня, $\Delta = 2,0 \dots 3$ мм. Шорсткість сьомої категорії - пориста, мікротріщинувата

поверхня з кавернами - $A = 3,0...5$ мм. За величиною шорсткості кожний наступний еталон відрізняється від попереднього на 7...10%.

Дослідження проведені на різних поверхнях з метою з'ясування ролі фізико-хімічних процесів адгезії й кристалізації новоутворень у формуванні контактної зони нового бетону зі старою бетонною поверхнею в різних умовах тверднення. Умови тверднення створювалися наступні: нормальне тверднення протягом 28 діб; витримування протягом перших трьох діб при температурах $+25^{\circ}\text{C}$ (при 100% вологості) і $+5^{\circ}\text{C}$ (природні умови - на даху лабораторії), після чого зразки до досягнення 28-добового віку перебували в нормальних умовах; витримування протягом першої доби у вологому піску й 27 діб - у воді. Поверхня нанесення (старий бетон) використовувалася у двох станах: у природному й очищеному шляхом видалення верхнього карбонізованого шару.

Дослідження здійснювалися у двох напрямках: визначення впливу умов тверднення на величину адгезії й характер кристалізації новоутворень у зоні контакту; визначення ролі фізико-хімічних процесів у формуванні контактної зони в часі.

Вплив умов тверднення на стан контактної зони досліджувався на зразках раннього віку (до 3 діб), оскільки вплив температурного фактора в цей період найбільш відчутний. Результати досліджень наведені у таблиці 3.1. У дослідженнях використаний портландцемент М 400.

Встановлено, що міцність зчеплення нового бетону на активованій в'язучій речовині незалежно від умов тверднення перевищує міцність зчеплення звичайного бетону у віці 3 діб у 3,1...3,4 рази при нанесенні на природну поверхню. Цей показник при ремонті очищеної поверхні зростає до 4 разів. У віці 28 діб міцність зчеплення збільшується практично в 3 рази незалежно від стану поверхні нанесення.

Таблиця 3.1 - Міцність зчеплення нового бетону з відновлюваною поверхнею

Умови тверднення	Вік зразків, діб	Міцність на відрив, МПа			
		звичайного бетону з поверхнею		бетону на активованій в'язучій речовині з поверхнею	
		природною	очищеною	природною	очищеною
Нормальні	3	0,71	0,83	3,13	4,38
	28	2,18	2,48	6,68	8,34
+25° С	3	0,81	0,95	3,93	5,13
	28	1,90	2,11	6,74	8,32
+5°С	3	0,62	0,71	2,34	2,97
	28	2,19	2,46	6,13	7,92
У воді	3	0,92	0,96	2,87	4,91
	28	2,29	2,61	7,18	8,36

Таким чином, можна зробити висновок, що умови тверднення й стан поверхні не чинять негативного впливу на величину зчеплення ремонтного шару бетону з поверхнею відновлюваної споруди при застосуванні активованої в'язучої речовини.

Для з'ясування причин зміни міцності адгезійного зчеплення нового бетонного покриття з поверхнею споруди досліджені склад і характер новоутворень у зоні контакту. Прийнято положення, що поверхня старого бетону є підкладкою, на якій насамперед виникають зародки нової фази - продукти гідратації цементної матриці бетону. Сила адгезії нового бетонного покриття й поверхні нанесення головним чином визначається характером взаємодії й зрощення гідратних новоутворень у зоні контакту з кристалогідратами старого бетону. Склад новоутворень у зоні контакту визначали безпосередньо з поверхонь, що контактують, методами електронної мікроскопії й рентгеноструктурного аналізу.

Встановлено [96], що склад новоутворень у зоні контакту звичайного ремонтного шару бетону приблизно однаковий незалежно від умов тверд-

нення й представлений гідроксидом кальцію, значною кількістю трьохсульфатної форми гідросульфоалюмінату кальцію, а при ремонті неопрацьованої поверхні ще й кальцитом. При відновленні конструкцій бетоном на активованій в'язучій речовині спостерігається зменшення кількості гідроксиду кальцію, що обумовлено зв'язуванням його іонами SiO_4^{4-} , які перебувають у рідкій фазі активованої цементної системи. Це припущення підтвердилося при проведенні мікроскопічного аналізу, при якому встановлена наявність гелевидної гідросилікатної маси.

На дифрактограмах проб контактної зони бетону на активованій в'язучій речовині з поверхнею нанесення як у віці 3 діб, так і 28 діб піки з $d/n=9,8$ і $5,6 \cdot 10^{-10}$ м, що відповідають трьохсульфатній формі гідросульфоалюмінату кальцію, відсутні. Отримані результати погоджуються з даними [48].

За даними [49], істотне зростання міцності зчеплення нового бетону на активованій в'язучій речовині з поверхнею нанесення пояснюється наступним. У процесі фізико-хімічної активації в'язучої речовини відбувається диспергування її часток до розмірів 4...9 мкм, що дозволяє їм кольматувати мікропори старого бетону. Поряд із цим, поверхня цементних часток під час нанесення ремонтного шару гідратована. Під час активації у цементній системі утворюється гідросилікатний гель, що виконує роль клею. Дослідженнями [87] підтверджується можливість розвитку міцного епітаксичного зрощення новоутворень. Рентгенофазовим аналізом встановлено, що зі збільшенням часу тверднення бетонного шару на активованій в'язучій речовині кількість новоутворень росте, а також змінюється їхній склад у результаті взаємодії з кристалогідратами поверхні нанесення, особливо на очищеній поверхні. Збільшується інтенсивність ліній низькоосновних гідросилікатів кальцію, наприклад, $d/n = 3,04; 2,80; 2,76 \cdot 10^{-10}$ м.

Найчастіше експлуатація транспортних споруд здійснюється в умовах корозійного впливу навколишнього середовища, тому проведені дослідження корозійної стійкості шару нового бетону на активованій в'язучій речовині.

Визначався вплив різних агресивних середовищ на бетон. Зразки-балочки розмірами 4x4x16 см витримувались у дніпровській воді, а також у розчині з

концентрацією сульфатів 10 г/л. Зразки формувались в один шар.

При витримуванні зразків звичайного бетону в сульфатному середовищі спостерігається зниження міцності при стиску на 12...23% залежно від тривалості витримування й марки використовуваного портландцементу. Починаючи з 38 діб для зразків на портландцементі М 400, а з 52 діб - на портландцементі М 500, на поверхні спостерігалось тріщиноутворення, змінювався колір зразків у зоні сильної сульфатизації. Зниження міцності бетону на активованій в'язучій речовині практично несуттєво та становить 3...6%, причому коефіцієнт сульфатостійкості K_c перебуває в межах 0,91...0,93. Стабілізація міцності в часі свідчить про перевагу конструктивних процесів над деструктивними (таблиця 3.2, 3.3).

Таблиця 3.2 - Міцність бетону на активованій в'язучій речовині при витримуванні у сульфатному середовищі

М _ц , вид бетону та умови зберігання		Міцність при стиску, МПа, у			K _c віці 180 діб
		віці, діб	28	90	
4400	Звичайний, занурені	30,7	28,6	24,3	0,79
	Звичайний, змінний рівень	28,6	27,3	22,2	0,77
	На активованій в'язучій речовині, занурені	61,3	62,8	60,3	0,98
	На активованій в'язучій речовині, змінний рівень	58,4	58,3	57,7	0,98
5500	Звичайний, занурені	39,6	38,1	31,3	0,79
	Звичайний, змінний рівень	38,7	36,4	30,2	0,78
	На активованій в'язучій речовині, занурені	67,4	66,7	65,8	0,97
	На активованій в'язучій речовині, змінний рівень	67,6	64,8	63,7	0,94

Таблиця 3.3 - Зміна вмісту сульфатів у ремонтному шарі бетону

М _ц , вид бетону й умови зберігання		Вміст сульфатів, % від маси бетону, у віці, діб		
		28	90	180
400	Звичайний, занурені	1,32	1,48	1,82
	Звичайний, змінний рівень	1,52	1,76	1,88
	На активованій в'язучій речовині, занурені	0,54	0,62	0,69
	На активованій в'язучій речовині, змінний рівень	0,59	0,70	0,74
500	Звичайний, занурені	1,16	1,41	1,79
	Звичайний, змінний рівень	1,61	1,73	1,85
	На активованій в'язучій речовині, занурені	0,64	0,71	0,74
	На активованій в'язучій речовині, змінний рівень	0,72	0,75	0,77

При проведенні хімічного аналізу в зразках звичайного бетону відзначений високий вміст сульфатів, що вказує на інтенсивне протікання сульфатної корозії. Вміст сульфатів у бетоні на активованій в'язучій речовині в 1,4...2,3 рази нижче. Це підтверджує підвищену стійкість бетону на активованій в'язучій речовині в умовах сульфатної агресії.

Для розкриття механізму впливу агресивного сульфатного середовища проведені дослідження якісного складу новоутворень цементної матриці ремонтного шару бетону, що дозволяє розкрити деякі причини його руйнування. Природно припустити, що на плин деструктивних процесів активно впливають процеси перекристалізації новоутворень, а також корозійні процеси з утворенням сульфатів. Ці процеси пов'язані зі зміною форми й об'єму кристалів продуктів гідратації й структуроутворення в агресивному середовищі й призводять до руйнування цементної матриці ремонтного шару бетону.

Закономірність поліпшення фізико-механічних характеристик бетону на активованій в'язучій речовині при тривалому водному зберіганні спостерігається й при визначенні модуля пружності й коефіцієнта Пуассона. Підвищене значення цих характеристик бетону на активованій в'язучій речовині зберігається протягом всіх термінів випробувань, таблиця 3.4.

Випробування зразків бетону, що зберігалися в концентрованому розчині сульфату натрію, показали наступні результати. У початковий період (90... 180 діб) у зразках звичайного бетону спостерігалось інтенсивне підвищення модуля пружності. Після 180 діб зазначені характеристики стали змінюватися, тобто почався період деструктивних явищ у бетоні за рахунок кристалізації гідросульфоалюмінату кальцію. Деструктивні явища в цей період в бетоні на активованій в'язучій речовині не спостерігалися.

Таблиця 3.4 - Деформативні характеристики зразків бетону після витримування в агресивних середовищах

Вид бетону	Середовище зберігання	Деформативні характеристики бетону			
		Модуль пружності, 10^3 МПа, у віці, діб		Коефіцієнт Пуассона у віці, діб	
		180	360	180	360
Звичайний (В/Ц=0,5)	Вода	27,3	27,8	0,28	0,31
	Розчин Na_2SO_4	28,2	26,3	0,29	0,32
	Розчин MgSO_4	27,9	27,4	0,31	-
Звичайний (В/Ц=0,42)	Вода	28,9	29,6	0,28	0,29
	розчин Na_2SO_4	29,2	27,4	0,29	0,30
	Розчин MgSO_4	28,7	26,1	0,30	-
На активованій в'язучій речовині (В/Ц=0,5)	Вода	57,3	56,1	0,23	0,24
	розчин Na_2SO_4	56,8	55,4	0,23	0,25
	Розчин MgSO_4	55,9	53,6	0,25	0,26
На активованій в'язучій речовині (В/Ц=0,42)	Вода	64,8	63,9	0,23	0,24
	розчин Na_2SO_4	63,6	62,9	0,24	0,24
	Розчин MgSO_4	64,1	63,3	0,24	0,25

У розчині MgSO_4 за рахунок вилуговування гідроксиду кальцію, а також магнезіальної й сульфатної корозії протягом всього терміну випробувань спостерігали різке зниження міцності звичайного бетону, що склало 34...51% залежно від віку й складу. У бетоні на активованій в'язучій речовині зниження міцності склало 5...9%.

Визначено повні поздовжні й поперечні деформації зразків бетону після 360 діб витримування в агресивних середовищах. Повні поздовжні й поперечні деформації мають максимальну величину: $\varepsilon_{\text{позд}}=10..12$ мкм/м, $\varepsilon_n =2,0..2,5$ мкм/м всіх складів звичайного бетону після витримування їх у розчині Na_2SO_4 .

У розчині MgSO_4 при рівні навантаження 50, 70 і 80% від руйнуючого зафіксовані значно менші поздовжні й поперечні деформації бетону на активованій в'язучій речовині. Так, при навантаженні 50% від R_{np} у контрольних зразків $\varepsilon_{\text{позд}}$ становить 4,0 мкм/м, у зразків на активованій в'язучій речовині - 2,8 мкм/м. При 70 % від R_{np} у контрольних зразків - 5,1 мкм/м, на активованій в'язучій речовині - 3,8 мкм/м.

У розчині MgSO_4 спостерігається істотне зниження модуля пружності й підвищення коефіцієнта Пуассона у контрольних зразків після 360 діб витримування. У зразків на активованій в'язучій речовині ці явища не зафіксовані.

У комплекс експлуатаційних властивостей бетону транспортних споруд входять також атмосферостійкість, водонепроникність і морозостійкість.

У процесі експлуатації транспортних споруд їхня поверхня піддається розтягуючим і стискаючим напруженням. Дослідження атмосферостійкості бетонних зразків з нанесеним шаром нового бетону на активованій в'язучій речовині здійснювались за прискореною методикою в кліматичній камері. Встановлено, що лінійні зміни зразків залежать від їхнього складу, причому використання активованої цементної системи істотно знижує деформації подовження.

Бетонні зразки на активованій в'язучій речовині характеризуються невеликою деформативністю протягом усього періоду випробувань. Близький характер залежності атмосферостійкості бетону на активованій в'язучій речовині спостерігався за зміною маси дослідних зразків. Слід зазначити, що при застосуванні активованої цементної системи приріст маси зразків незначний у порівнянні зі звичайним бетоном. У зразках звичайного бетону збільшення їхньої маси супроводжується зростанням необоротних деформацій, очевидно, за рахунок водопоглинання при наявності відкритої пористості.

Таким чином, бетон на активованій в'язучій речовині в специфічних умовах експлуатації гарантована досить висока атмосферостійкість. Відзначене також підтверджується стабільними значеннями міцності матеріалу в процесі випробувань. Для звичайного бетону спостерігається спад міцності як при стиску, так і при згині. Еталонні зразки почали руйнуватися після циклу позмінного водонасичення й висушування, тоді як зразки бетону на активованій в'язучій речовині перебували в задовільному стані до 210 циклів, після яких випробування були припинені.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що одержання бетонів з високими експлуатаційними властивостями для ремонтно-відновлювальних робіт на транспортних спорудах можливо при використанні активованої в'язучої речовини зі спеціальним органо-мінеральним комплексом поліфункціональної дії.

2. З метою визначення закономірностей якісного формування мікроструктури досліджена пористість активованої цементної системи. Пористість цементного каменю нормального тверднення характеризується двома основними групами пор - мікропорами з радіусами $30...40 \cdot 10^{-8}$ м і $20...30 \cdot 10^{-7}$ м. Фізико-хімічна активація цементної системи зсонує максимуми у бік менших радіусів пор - $30...80 \cdot 10^{-9}$ м, що свідчить про впорядковану структуру цементної системи у порівнянні з еталонним зразком, і створює передумови для формування щільної структури цементної матриці бетону.

3. Встановлено, що при фізико-хімічній активації цементної системи спрямованим розвитком процесу створюються необхідні умови для утворення матриці - носія майбутніх властивостей необоротної кристалізаційної структури матеріалу. В особливо ранній період гідратації передається енергія для подолання енергетичного бар'єра з утворенням більшого числа коагуляційних контактів. В активованій цементній системі різнорозмірні гідратні елементи упаковуються таким чином, що утворюють кількість контактів на одиницю об'єму на 2...3 порядки більше, ніж у цементній матриці бетону нормального тверднення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пшинько А.Н. Подводное бетонирование и ремонт искусственных сооружений. Днепропетровск: Пороги, 2000. 412 с.
2. Пшинько А.Н., Руденко Н.Н. Проблема восстановления искусственных транспортных сооружений. *Сб. науч. тр. "Строительство, материаловедение, машиностроение"*. Днепропетровск: GAUDEAMUS. 2000. Вып. 10. С. 328-331.
3. Пшинько А.Н., Руденко Н.Н. Проблемы ремонта инженерных транспортных сооружений. *Залізничний транспорт України*. 2000. № 3. С. 12- 14.
4. Хаютин Ю.Г. Монолитный бетон. Москва: Стройиздат, 1991. 576 с.
5. Михайлов К.В., Волков Ю.С. Бетон и железобетон в строительстве. - Москва: Стройиздат, 1987. 103 с.
6. Хигерович М.И., Байер В.Е. Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, растворов и бетонов. Москва: Стройиздат, 1979. 217 с.
7. Ахмедов К.С., Хидоятов К.Х., Хакимов Н.Х. Производственный опыт применения комплексной добавки в гидротехническом бетоне. *Архитектура и строительство Узбекистана*. 1984. № 10. С. 6-7.
8. Батраков В.Г. Комплексные модификаторы свойств бетона. *Бетон и железобетон*. 1997. № 7. С. 5-7.
9. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. Москва: Стройиздат, 1980.
10. Воробьев В.А., Кивран В.К., Корякин В.П. Применение физико-математических методов исследования свойств бетона. Москва: Высшая школа, 1987. 212 с.
11. Bemsted J. Further Aspect of Setting of Portland Cement//Silicat ind. - 1983.V. 48.N9.P. 167-170.
12. John M. Hooks. HPS bridges for the 21-st century//Bridge Views. 1999.- Issue N 6.P. 1-3.
13. Ivan Razel. Repair of reinforced concrete bridge structures. Materials and Methods. *Сб. научи, трудов «Автомобильные дороги и дорожное строительство»*. Киев: УГУ. 2000. № 59. С. 257-263.
14. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. Москва: Строй- издат, 1975. 700 с.

15.R.K. Dhir, M.R. Jones, H.E.H. Ahmed, A.G.M. Seneviratne Rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete/. *Mag. Comer. Res.* 1990. Vol. 42.No. 152.P. 177-185.

16.Батраков В.Г. Модифицированные бетоны: теория и практика. Москва: Стройиздат, 1998. 768 с.

17.Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф., Коллепарди М. Добавки в бетон. Москва: Стройиздат, 1988. 571 с.

18.Ramakrishnan V., Coyle W., Pande S. Workability and strength of superplastifised concrete. *Indian Concrete J.* 1980. Vol. 54. N 1. P. 23-26.

19.Файнер М.Ш. Техничко-экономическая оценка добавок к бетонам. *Известия вузов. Строительство и архитектура.* 1983. № 3. С. 73-77.

20.Ramakrishnan V., Coyle W., Pande S. Workability and strength of superplastifised concrete. *Indian Concrete J.* 1980. Vol. 54. N 1. P. 23-26.

21.Сытник Н.И., Файнер М.Ш., Андрианова Г.С. Эффективная добавка к бетонным смесям и строительным растворам. *Пром. строительство и инженерные сооружения.* 1992. № 2. С. 12.

22.Пластифицирующие композиции для цементных систем различного назначения. Беспроскурный И.А., Левенец Л.Д., Пунагин В.Н. Москва, 1989. 35 с. Ден. в ВНИИЭСМ 04.05.89, № 1785. Аннот. в ред. сб. ВНИИЭСМ.

23.Гладков В.С., Виноградова Э.А. Высокопрочные бетоны с добавками суперпластификаторов для морских гидротехнических сооружений/Бетоны с эффективными суперпластификаторами. Москва: НИИЖБ, 1979. С. 126-138.

24. Файнер М.Ш. Рациональное направление применения добавок к бетонам. *Строительные материалы и конструкции.* 1990. № 1. С. 23-24.

25. Бочаров Н.М. Производство изделий с добавками. *Бетон и железобетон.* 1991.-№ 9. С. 16-17.

26. Черкинский Ю.С., Юсупов Р.К., Князькова И.С. Суперпластификатор НИЛ-20.. *Бетон и железобетон.* 1990. № 6. С. 8-9.

27. Бочаров Н.М. Производство изделий с добавками. *Бетон и железобетон.* 1991. № 9. С. 16-17.

28. Хигерович М.И., Байер В.Е. Гидрофобно-пластифицирующие до-

бавки для цементов, растворов и бетонов. Москва: Стройиздат, 1999. - 125 с.

29. Файнер М.Ш. Ресурсосберегающая модификация бетона. Черновцы: Прут, 1993. 152 с.

30. Соломатов В.И., Тахиров М.К., Ханин В.К. Ресурсосберегающая технология бетона. Ташкент: Мехнат, 1990. 239 с.

31. Пшинько А.Н., Заяц Ю.Л., Громова Е.В. Факторы, влияющие на контактную прочность и пути интенсификации процессов сцепления нового бетона со старым при ремонте транспортных сооружений. *Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве*. Днепропетровск: Арт-Пресс. 2000. Вып. 9. -С. 12-14.

32. Гранковский И.Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах. Киев: Наукова думка, 1984. -300 с.

33. Теория цемента/Под ред. А.А. Пащенко. Киев: Будівельник, 1991. 168 с.

34. Цементные бетоны с минеральными наполнителями/Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов., В.Н. Выровой, С.М. Чудновский. Киев: Будівельник, 1991. 136 с.

35. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. Москва: Химия, 1980. 319 с.

36. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Бетоны нового поколения для подземных сооружений. *Труды международной конференции "Подземный город: геотехнология и архитектура"*. Санкт-Петербург. 1998. С. 224-227.

37. Курбатова И.И., Глекель Ф.Л. Влияние органических добавок на кинетику изменения состава жидкой фазы и структурообразование цементных паст. *Физико-химические исследования цементного камня и бетона*. Москва: НИИЖБ ОНТИ, 1992. С. 43-57.

38. Вальден П.И. Теории растворов в их исторической последовательности. Петроград: Научное хим.-техн. изд., 1981. 376 с.

39. Мейер К. Физико-химическая кристаллография. М. : Металлургия, 1972. 380 с.

40. Осипов К.А. Некоторые активируемые процессы в твердых

металлах и сплавах. Москва: Изд. АН СССР, 1962. 132 с.

41. Дистлер Г.И. Реальная структура твердых тел как определяющий фактор механохимических процессов. *Труды V Всесоюз. симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел.* Таллинн. 1987. Т. 1. С. 49-52.

42. Быков В.И., Свитин А.П. Методы расчета параметров активации молекул. Новосибирск: Наука, 1988. 210 с.

43. Пащенко А.А., Воронков М.Г., Михайленко Л.А. и др. Гидрофобизация. Киев: Наукова думка, 1973. 236 с.

44. Круглицкий Н.Н., Вагнер Г.Р., Гранковский И.Г., Детков В.П. Физико-химическая механика тампонажных растворов. Киев: Наукова думка, 1974. 287 с.

45. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. Москва: Химия, 1988. 256 с.

46. Матвиенко В.А., Толчин С.М. Электрические явления и активационные воздействия в технологии бетона. Макеевка: ОМС ДГАСА, 1998. 154 с.

47. Руденко Н.Н. Тяжелые бетоны с высокими эксплуатационными свойствами. Днепропетровск: Арт-Пресс, 1999. 260 с.

48. Руденко Д.В. Бетони спеціального призначення для відновлення транспортних споруд. *Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету.* 2007. № 71(94). С. 362-366.

49. Пшинько А.Н., Руденко Д.В., Пунагина Ю.В. Бетоны с высокими эксплуатационными свойствами для специальных ремонтно-восстановительных работ. *Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту.* 2006. Вип. 11. С. 189-192.

50. Пшинько А.Н., Руденко Н.Н., Пунагин В.В., Руденко Д.В., Пунагина Ю.В., Белошицкая Н.И. Технология защиты конструкций сооружений специального назначения. *Сборник научных трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры «Строительство, материаловедение, машиностроение».* 2005. Вып. 35. Ч. 2. С. 138-144

51. Прочность, структурные изменения и деформации бетона/Под ред. А.А. Гвоздева. НИИЖБ Госстроя. Москва: Стройиздат, 1987. 299 с.
52. Степанян В.А. Нормальное сцепление раствора с камнем. Ереван, 1950. 186 с.
1974. Пулатов З.П., Усманов Х.Л. Влияние количества щелочей в цементе на линейные деформации цементно-песчаных растворов. ДАН УзССР. -№ 12.- С. 1147-1158.
53. Ребиндер П.А. Проблемы образования дисперсных систем и структур в этих системах. Физико-химическая механика дисперсных структур и твердых тел. *Современные проблемы физической химии*. Москва: Изд. МГУ. 1968. С. 334-414.
54. Henry G. Russel. Why use high-performance concrete?. *Concrete Products*. 1999. Issue No. 3. P. 122-123.
55. John M. Hooks. HPS bridges for the 21-st century. *Bridge Views*. 1999. Issue No. 6. P. 1-3.
56. Дерягин Б.В. Приготовление высокопрочных бетонов путем предварительной виброобработки раствора. *Гидротехническое строительство*. 1955. №2. С. 65-67.
57. Пшінько О. М. Підвищення довговічності бетонних та залізобетонних виробів і конструкцій. Дніпропетровськ: ДІТ, 1995. 100 с.
58. Яковлев И.И., Николаев А.В. Клатратообразование и физико-химический анализ экстракционных систем. Новосибирск: Наука, 1975. 190 с.
59. Химия цементов / Под ред. Х.Ф.У. Тейлора. Москва: Стройиздат, 1969. 566 с.
60. Адир Ю.П., Мароква Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. Москва: Наука, 1976. 279 с.
61. Белый И.В. Основы научных исследований и технического творчества. Харьков: Вища школа, 1989. 199 с.
62. Mannell R. Comparison Tool Test Saves Time he Tool Engineer. 1989. Vol. 43. N3. P. 121-136.
63. Tomosawa F. Development of a kinetic model for hydration of ce-

ment//Proc. of the X International Congress on the Chemistry of Cement. - Geteborg. 1997. Vol. 2. P. 43-50.

64. Nonat A., Lecoq X., Gauffinet S. Calcium hydroxide concentration on Solution: parametr determining of the early hydration of tricalcium silicate and the characteristics of the products. Proc. of the X International Congress on the Chemistry of Cement. Geteborg. 1997. Vol. 2. P. 50-55.

65. Большаков В.И., Руденко Н.Н. Принцип взаимности активационных воздействий при структурообразовании материальных систем. *Вісник академії: Наук, та інформ. бюл.* ПДАБА: Дніпропетровськ. - 2000. - № 3. - С. 23-30.

66. Большаков В.И., Притыкин Л.М., Пунагин В.Н., Руденко Н.Н. Исследование влияния интенсивности активации на свойства цементного камня/ *Вісник академії: Наук, та інформ. бюл.* ПДАБА: Дніпропетровськ. 1999. №7. С. 17-23.

67. Руденко Н.М, Білошицька Н.І., Руденко Д.В. Фізико-хімічні закономірності структуроутворення бетонів з високими експлуатаційними властивостями. *Сборник научных трудов Луганского национального аграрного университета.* 2005. № 6. С. 68-75.

68. Руденко Н.Н., Пунагин В.В., Белошицкая Н.И., Руденко Д.В., Бугаев В.А. Особенности физико-химических взаимодействий в активированной цементной матрице бетона. Композиційні матеріали для будівництва. *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури.* 2006. № 5(61). С. 103-109.

69. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. Москва: Химия, 1988. -256 с.

70. Шаскольская М.П. Кристаллы. Москва: Наука, 1985. 208 с.

71. Стадельман С. Гидратация цемента. *Труды VIII Международного конгресса по химии цемента.* - Москва: ВНИИЭСМ. 1989. Т. 2. С. 213-218.

72. Антонченко В.Я. Физика воды. Киев: Наукова думка, 1986. 128 с.

73. Айлер Р. Химия кремнезема: Пер. с англ. Москва: Мир, 1982. Ч. 1. 416 с.

74. Глекель Ф.Л., Копп Р.З., Ахмедов К.С. Регулирование гидратацион-

ного структурообразования поверхностно-активными веществами. Ташкент: ФАН, 1986. 224 с.

75. Тейлор Х.Ф.У. Химия гидратации цемента. *Труды VIII Международного конгресса по химии цемента*. Москва: ВНИИЭСМ. 1989. Т. 2. С. 17-91.

76. Формирование и генезис микроструктуры цементного камня/Под ред. Л.Г. Шпыновой. Львов: Вища школа. Изд-во при Львовском ун-те, 1975. 160 с.

77. Пшинько А.Н., Руденко Н.Н., Пунагин В.В., Руденко Д.В., Пунагина Ю.В., Белошицкая Н.И. . Технология защиты конструкций сооружений специального назначения. *Сборник научных трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры «Строительство, материаловедение, машиностроение»*. 2005. Вып. 35. Ч. 2. С. 138-144.

78. Grudemo A. The microstructures of cement gel phases. Goteborg, 1965. 234 p.

79. Richartz W., Locher F.W. A Contribution to the morphology and combination with water of calcium silicate hydrates and to the structure of the hardened cement paste. *Zement-Kalk-Gips*. 1965. No 18. S. 449-459.

80. Shayan A., Quick G.W. Microscopic Features of Cracked and Uncracked Concrete Railway Sleepers. *ACI Materials Journal*. 1992. Vol. 89. No. 4. P. 348-360.

81. Мурин А.Н. Химия несовершенных ионных кристаллов. Львов: Изд. ЛГУ, 1985. 272 с.

82. Jost K.N., Zimmer B. Relation between the Crystal Structures of Calcium Silicates and their Reactivity against Water . *Cem. and Concr. Res.* 1984. V. 14. P. 177-184.

83. Role of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar and Concrete /X. Cong, S. Gong, D. Darwin, S.L. McCabe//*ACI Materials Journal*. - 1992. Vol. 89. No. 4. P. 375-386.

84. Reading T.J. Shotcrete as a construction material. Shotcreting. 1987.

Publication SP-14. ACL P. 98-118.

85.Красильников Г.К., Скоблинская Н.Н. Физико-химическая природа влажностных деформаций цементного камня. Ползучесть и усадка. Москва: НИИЖБ. 1989. С. 129-142.

86.Стольников В.В., Литвинова Р.Е. Трещиностойкость бетона. Львов: Энергия, 1982. 88 с.

87.Sawaide M., Iketani J. Rheological Analysis of the Behavior of Bleed Water from Freshly Cast Mortar and Concrete .ACI Materials Journal. 1992. Vol. 89. No. 4. P. 323-328.

88.Пунагин В.Н. Технология бетона в условиях сухого жаркого климата. - Ташкент: ФАН, 1977. 246 с.

89. Горчаков Г.И., Лифанов И.И., Терехин М.Н. Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов. Москва: Стройиздат, 1988. 168 с.

90. Чистов А.В. Расчет нарастания прочности бетона при различных температурах выдерживания. *Бетон и железобетон*. 1994. № 8. С. 14-17.

91. Болдырев А.С., Добужинский В.И., Рекитар Я.А. Технический прогресс в промышленности строительных материалов. Москва: Стройиздат, 1980. 398 с.

92. Иосилевский Л.И. Долговечность предварительно напряженных железобетонных балочных пролетных строений мостов. Москва: Транспорт, 1987.288 с.

93. Заседателев Н.Б., Богачев Е.И. Развитие трещин в цементном камне и бетоне при кратковременном и длительном сжатии. *Бетон и железобетон*. 1982.№11.С. 23-25.

94. Антипов А.С. Поля усадочных напряжений в балочных предварительно напряженных пролетных строениях мостов. Труды МИИТ Москва: 1986. Вып. 219. С. 5-41.

95. Ганин В.П. Расчет нарастания прочности бетона при различных температурах выдерживания. *Бетон и железобетон*. 1994. № 8. С. 14-17.