

Міністерство освіти і науки України  
Харківський державний технічний університет  
будівництва та архітектури

ПЛУГІН Андрій Аркадійович

УДК 691.327/328 (043.3)

**ДОВГОВІЧНІСТЬ БЕТОНУ І ЗАЛІЗОБЕТОНУ  
В ОБВОДНЕНИХ СПОРУДАХ:  
КОЛОЇДНО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ**

05.23.05 - будівельні матеріали та вироби

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків 2005

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту  
Міністерства транспорту і зв'язку України  
на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд

Науковий консультант – Лауреат Державної премії України,  
Заслужений діяч науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор  
БАБУШКІН Володимир Іванович  
Харківський державний технічний університет  
будівництва та архітектури,  
завідувач кафедри будівельних матеріалів та виробів

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор  
ОЛЬГІНСЬКИЙ Олександр Георгійович  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, професор кафедри будівництва  
та експлуатації автомобільних доріг  
  
Заслужений діяч науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор  
ВОЗНЕСЕНСЬКИЙ Віталій Анатолійович  
Одеська державна академія будівництва  
та архітектури, завідувач кафедри процесів і апаратів  
в технології будівельних матеріалів  
  
Доктор технічних наук, професор  
ФАЙВУСОВИЧ Абрам Соломонович  
Луганський національний аграрний університет,  
професор кафедри будівельних конструкцій

Провідна установа – Київський національний університет  
будівництва та архітектури,  
кафедра будівельних матеріалів

Захист відбудеться «    » \_\_\_\_\_ 2005 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради  
Д 64.056.04 Харківського державного технічного університету будівництва та архітектури за адре-  
сою: вул. Сумська 40, м. Харків, 61002

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського державного технічного університету  
будівництва та архітектури за адресою: вул. Сумська 40, м. Харків, 61002

Автореферат розісланий «    » \_\_\_\_\_ 2005 р.

Вчений секретар Спеціалізованої  
вченої ради к.т.н., доц.

О.Ю.КРОТ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Значна частина відповідальних бетонних, залізобетонних, кам'яних конструкцій та споруд з проектними або економічно доцільними строками служби не менше 100 років, яка експлуатується в умовах часткового обводнення (транспортних тунелів, водопропускних труб, мостів, колекторів, ємкісних споруд і т.п.), зазнає пошкоджень, знаходиться в незадовільному стані і виходить із ладу значно раніше нормативних термінів служби, що часто вимагає великих експлуатаційних витрат і невідкладного капітального ремонту. Головними причинами недостатньої довговічності конструкцій з бетону вважають: недосконалість систем забезпечення якості вихідних матеріалів і кінцевого продукту; посилення негативних дій (агресивності середовищ, навантажень); виготовлення бетонів низьких класів за міцністю із високомарочних цементів. Проте знання вказаних факторів і причин та спроба їх усунення не привели до вирішення проблеми недостатньої довговічності обводнених бетонних і залізобетонних конструкцій, що свідчить про існування інших факторів і причин, до кінця не розкритих, дослідженню яких стосовно обводнених споруд присвячена дисертація. Тобто основною причиною недостатньої довговічності таких конструкцій і споруд є недосконалість теоретичних уявлень про міцність і довговічність цементного каменю, бетону і конструкцій з них, на яких ґрунтується будівництво та експлуатація споруд. Це не дозволяє реалізувати їх великі потенційні можливості з довговічності. Отже, тема дисертації, присвячена розвитку теорії довговічності бетону і залізобетону в обводнених спорудах, створенню теоретичних і методичних основ підвищення їх довговічності та відновлення експлуатаційних властивостей, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Української державної академії залізничного транспорту в рамках держбюджетних і госпдоговірних НДР, які проводяться згідно з галузевими програмами Міністерства транспорту України, Укрзалізниці, а також планами залізниць України (№№ДР 0194U009101, 0197U003549, 0100U000825 та ін.).

**Мета дослідження** – розвиток теорії довговічності бетону і залізобетону в обводнених спорудах на основі положень колоїдної хімії, фізико-хімічної механіки дисперсних систем і електрогетерогенних взаємодій в них, створення на цій основі комплексу високоефективних способів захисту, відновлення і продовження термінів служби конструкцій та споруд.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі завдання досліджень:

- виконати аналіз технічного стану, методик його оцінки, агресивних дій, ефективності матеріалів і технологій для захисту і відновлення обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій та споруд, основних факторів і причин їх передчасних пошкоджень і невисокої довговічності;
- виконати аналіз існуючих уявлень про міцність, руйнування і довговічність бетону, механізми його корозії, прогнозування довговічності;

- уточнити геометричні характеристики, морфологічні ознаки та електроповерхневі властивості структурних елементів цементного каменю, з урахуванням яких розвинути кількісну теорію міцності цементного каменю;
- виконати дослідження і розробити уявлення про механізми довготривалої повзучості і безнапірної водопроникності цементного каменю і бетону, їх впливу на довговічність залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в умовах обводнення та згину, вивести кінетичні рівняння відносної деформації повзучості;
- виконати дослідження і розвинути теоретичні уявлення про механізми корозії бетону, у тому числі біохімічної, що визначають довговічність обводнених конструкцій з нього, вивести відповідні кінетичні рівняння для прогнозування термінів служби обводнених конструкцій в умовах корозії;
- розробити нові принципи визначення складів бетону з низькими деформівністю і водопроникністю для обводнених конструкцій, а також нові способи визначення таких складів;
- вибрати комплекс високоефективних матеріалів, способів і технологій для захисту, відновлення і підвищення довговічності обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій та споруд;
- розробити на основі одержаних кінетичних рівнянь, способів визначення складів і т.п. алгоритми прогнозування і проектування довговічності обводнених конструкцій та споруд;
- провести експлуатаційні випробування і впровадити результати теоретичних і експериментальних досліджень при ремонтах обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій та споруд.

*Об'єкт дослідження* – цементний камінь, бетон, залізобетон, матеріали для захисту і відновлення бетону і конструкцій з нього.

*Предмет дослідження* – процеси і явища, що визначають структуру, міцність, руйнування, захист від руйнування і довговічність цементного каменю, бетону, залізобетону в спорудах з проектним строком служби не менше 100 років, які експлуатуються в умовах часткового обводнення.

*Методи досліджень.* Теоретичні дослідження виконані на основі положень і закономірностей колоїдної хімії, зокрема її розділу – фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів. При експериментальних дослідженнях матеріалів і конструкцій використовували стандартні і спеціальні методи досліджень: реологічні – за допомогою віскозиметра ВЗ-1; фільтраційні – шляхом вимірювання безнапірної водопроникності  $W_{be}$ . Вимірювання короткочасних і довготривалих деформацій зразків і конструкцій здійснювали тензорезисторним методом за допомогою автоматичного вимірника деформацій АИД-4, а також за допомогою прогиномірів ПМ-3 та індикаторів ИЧ-1, а розкриття тріщин – за допомогою відлікового мікроскопа МПБ-2. У дослідженнях застосовували такі методи фізико-хімічного аналізу: рентгенофазовий – за допомогою дифрактометра ДРОН-3; інфрачервоної спектроскопії – спектрометра «Термоніколет-360»; диференційно-термічний – пірометра ФПК-55; електронно-

мікроскопічний – електронного мікроскопа EM-5 методом вугільних реплік з додатковим збільшенням електронних фотознімків за допомогою ПЕОМ. Дослідження електроповерхневих властивостей речовин виконували шляхом вимірювань електрокінетичного  $\zeta$ -потенціалу методом потенціалу течії, методами вимірювань у високовольтному електричному полі та адсорбції колірних індикаторів за вдосконаленими автором методиками.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- встановлено, що основними факторами передчасних пошкоджень і зниження довговічності бетонних, залізобетонних, кам'яних споруд є обводнення, велика довжина конструкцій, що вигинаються і зазнають значних деформацій з утворенням тріщин, нестабільність цементного каменю, розчину і бетону за довготривалою повзучістю і безнапірною водопроникністю;
- встановлені геометричні характеристики, морфологічні ознаки та електроповерхневі властивості структурних елементів цементного каменю на субмікрорівні, які визначають його міцність і довговічність: показано, що на субмікрорівні структурними елементами цементного каменю є частинки кристалогідратів і глобули гідросилікатного гелю, які є агрегатами частинок гелю; визначені рівноважні електроповерхневі потенціали кристалогідратів  $Ca(OH)_2$  і гідросилікатів кальцію при різних рН;
- розроблена схема будови електрогетерогенних контактів між структурними елементами в цементному камені і бетони, в якій виділені парні контакти між потенціалвизначальними іонами; за її допомогою розроблені основи кількісної теорії міцності цементного каменю і бетону з відповідними рівняннями; встановлена залежність корозійної стійкості цементного каменю від стабільності кристалогідратів  $Ca(OH)_2$ , при розчиненні яких зменшується кількість електрогетерогенних контактів між ними і гідросилікатним гелем;
- встановлене оптимальне співвідношення кристалогідратів і гідросилікатного гелю  $(K/\Gamma)_{opt} = 0,9 \div 1$ , яке разом з оптимальними величинами  $(B/C)_{opt}$  і коефіцієнтів розсунення зерен дрібного і крупного заповнювача  $\mu_{opt}$  і  $\alpha_{opt}$  забезпечує максимальні міцність, щільність, довговічність цементного каменю, розчину, бетону;
- розроблені уявлення про механізм довготривалої повзучості та безнапірної водопроникності цементного каменю і бетону, згідно з якими показано, що довготривала повзучість бетону обумовлена фільтрацією води із стиснутих зон конструкцій у розтягнуті за закономірностями безнапірної водопроникності; виведені відповідні рівняння для прогнозування довговічності конструкцій за деформаціями, в яких кінетика і граничні деформації залежать від довжини шляху фільтрації,  $B/C$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$ , безнапірної водопроникності  $W_{be}$ ;

- розвинуті теоретичні уявлення про механізми корозії бетону обводнених конструкцій, які включають вилуговування при фільтрації води крізь бетон і його омиванні, карбонізацію (карбонатизацію\*), біохімічну корозію; встановлено, що механізми і кінетика цих видів корозії обумовлені фільтраційними потоками під дією безнапірної водопроникності бетону, капілярного та осмотичного тиску, дифузійними потоками іонів агресивних речовин і продуктів розчинення, електрофоретичним прониканням клітин бактерій углиб бетону; розроблені відповідні кінетичні рівняння для прогнозування термінів служби обводнених конструкцій в умовах агресивних дій;
- розроблені нові принципи визначення складів бетону з низькими деформівністю і водопроникністю для обводнених конструкцій, що полягають в забезпеченні високої вібророзтічності бетонної суміші при її безосадковості ( $OK \rightarrow 0$ ) за рахунок забезпечення оптимальних значень водоцементного відношення  $(B/C)_{opt}$ , витрати добавки-суперпластифікатора і коефіцієнтів  $\mu_{opt}$  і  $\alpha_{opt}$ .

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробленні та упровадженні комплексу високоефективних методик досліджень, матеріалів і технологій для захисту, відновлення і продовження термінів служби обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій і споруд, зокрема:

- розроблені Рекомендації (Пам'ятки) для країн-учасниць Організації співробітництва залізниць (ОСЗ, 25 країн) та Інструкція для підприємств Укрзалізниці з визначення складу бетону і розчину понижених деформівності та проникності для транспортних споруд і підрейкових основ; рекомендації упроваджені при проведенні експериментального ремонту тунелю на Львівській залізниці, мостових опор на Південній залізниці;
- розроблені Рекомендації (Пам'ятки) для країн-учасниць ОСЗ і нормативи для Укрзалізниці з відновлення експлуатаційних властивостей залізничних інженерних споруд. Рекомендації упроваджені в проекті і ремонті тунелю на Львівській залізниці, відновленні мостових опор і прогонових споруд мостів на Південній і Одеській залізницях, на їх основі були підготовлені документи для участі в тендерах ТОВ «Viadukts» (Латвія) і ЛЛСП ТОВ «Viadukas» (Литва) на ремонт водопропускної труби під високим насипом на Латвійській залізниці і Каунаського залізничного тунелю на Литовській залізниці;
- розроблені рекомендації із застосування для санації споруд водовідведення кислотостійких в'язучих композицій і бетонів;
- результати досліджень використані у навчальному процесі, у тому числі включені в 6 підготовлених у співавторстві навчальних посібників.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертації одержані здобувачем особисто. Окремі аспекти теоретичних досліджень, експериментальні і натурні дослідження, а також впровадження результатів досліджень виконані із співавторами праць, вказаних у списку джерел.

\* Прийнятий у будівництві згідно з СТ СЭВ 4419 термін «карбонізація» за змістом відповідає прийнятому в геологічних науках терміну «карбонатизація»

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися: на Міжнародних конгресах –10 і 11 з хімії цементу (Гетеборг, Швеція, 1997, Дурбан, Південна Африка, 2003); на Міжнародних конференціях, нарадах і семінарах: «Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж» (Донецьк, 2003); «Рациональные энергосберегающие конструкции, здания и сооружения в строительстве и коммунальном хозяйстве» и «Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии» (Белгород, 2002, 2003); «Межрегиональные проблемы экологической безопасности» (Суми, 2002); з хімії і технології цементу (Москва, 2000); «Долговечность и защита конструкций от коррозии: Строительство, реконструкция» (Москва, 1999); з колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки дисперсних систем, присвяченої 100-річчю П.О.Ребіндера (Москва, 1998); «Розвиток технічної хімії в Україні» (Харків, 1995, 1997); «Modern Building Materials, Structures and Techniques» (Вільнюс, 1995); «Теория и практика строительства и строительных материалов» (Суми, 1994); науково-практичних і науково-технічних конференціях, семінарах, читаннях і школах: «Структура, властивості та склад бетону» (Рівне, 2004); «Безопасность движения поездов» (Москва, 2004); «Физико-химические проблемы в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» (Харків, 2004); «Математичні моделі процесів в будівництві» (Луганськ, 2004); «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення» (Київ, 2000); «Физико-химические проблемы строительного материаловедения» (пам'яті О.П.Мчедлова-Петросяна, Харків, 1998); «Вибротехнология-96» (Одеса, 1996); щорічних Науково-технічних конференціях УкрДАЗТ (2002÷2004) і ХДТУБА (1995÷2002); нарадах експертів V Комісії з технічних питань Організації співробітництва залізниць з тематики «Путь и инженерные сооружения» (Саратов, 1996; Алмати, 1997; Маріанське Лазне, Чехія, 1997; Варна, 1998, 1999, 2000, 2003; Львів, 1998; Таллінн, 1999; Пекін, 2001; Сомбатхей, Угорщина, 2002; Юрмала, 2004).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 35 статей у наукових журналах і збірниках наукових праць, що входять до переліку ВАК, з яких 6 опубліковані одноосібно, одержано 7 патентів на винаходи.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 411 найменувань, 5 додатків і викладена на 442 сторінках, які включають 282 сторінки основного тексту, 28 таблиць і 179 рисунків.

## ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** сформульовано актуальність теми, мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення роботи.

**У першому розділі** проаналізовані існуючі дані про технічний стан, агресивні дії, дефекти і пошкодження, їх основні фактори і причини, а також способи захисту і відновлення обводнених

бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій та споруд. Найчисленніші матеріали з цих аспектів наводять: з мостів і тунелів – В.С.Артамонов, О.Л.Брик, В.П.Волков, К.В.Гайдук, О.Г.Ольгінський, В.О.Осипов, А.М.Плугін із співр., О.М.Пшінько, Ю.М.Спичак, Н.Є.Страхова, В.Г.Храпов, А.П.Чехов, А.О.Шкуратовський, Г.Н.Ейхе та ін.; з каналізаційних споруд – В.І.Бабушкін, В.М.Васильєв, Д.Ф.Гончаренко, Г.Я.Дрозд, І.В.Корінько, Т.Нагибина, Є.С.Обухов, С.В.Яковлев та ін. Проаналізовані також існуючі методики визначення технічного стану конструкцій і споруд. Основоположний внесок в розроблення методології оцінки їх технічного стану внесли і вносять С.Н.Коваленко, А.І.Лантух-Лященко, В.Л.Чернявський, В.П.Чирков та ін.

У результаті аналізу показано, що існуючі методики не дозволяють достатньо об'єктивно відображати технічний стан обводнених конструкцій і споруд, зокрема на залізницях України і країн-учасниць ОСЗ. Уточнені основні фактори передчасних пошкоджень залізобетонних конструкцій і споруд: обводненість і довжина конструкцій, що згинаються; неоднорідність розчину і бетону за деформаційними (довготривала повзучість) і фільтраційними (безнапірна водопроникність) властивостями; недосконалість захисних і ремонтних матеріалів і технологій. Основною причиною передчасного зниження довговічності обводнених залізобетонних конструкцій і споруд є недосконалість теорії міцності і довговічності бетону і конструкцій з нього.

**У другому розділі** охарактеризовані методи досліджень і матеріали.

**У третьому розділі** виконаний аналіз існуючих уявлень про корозію і довговічність бетону і конструкцій з нього. Значний внесок у розвиток цих уявлень внесли: Є.І.Андреюк, С.М.Алексєєв, В.С.Артамонов, В.І.Бабушкін, А.Л.Вайнштейн, С.Г.Васильєв, Є.А.Гузєєв, Б.В.Гусєв, Л.М.Добшиц, Г.Я.Дрозд, І.Н.Заславський, Ф.М.Іванов, В.В.Кінд, О.В.Котельников, В.М.Латипов, С.М.Леонович, С.Модри, В.М.Москвін, М.А.Мошанський, О.Г.Ольгінський, А.М.Плугін, О.Ф.Полак, В.Б.Ратінов, М.К.Розенталь, В.І.Соломатов, О.О.Старосельський, В.Ф.Степанова, А.С.Файвусович, В.Л.Чернявський, С.В.Шестоперов, П.Шисль, Й.Штарк, J.Davidovits, G.Frohnsdorf, K.Shirajama, K.Okada, S.D.Pomeroy, J.Wright та ін.

При аналізі розглянуто: нормативні, розрахункові, дійсні і потенційні терміни служби бетону і конструкцій з нього; основні фактори і причини зниження строків служби обводнених конструкцій з бетону; шляхи підвищення довговічності; методологію і досвід прогнозування термінів служби бетону і конструкцій з нього; теоретичні уявлення про механізми корозії бетону.

Вважають, що термін служби тунельних обробок до капітального ремонту повинен складати не менше 100 років. Економічно доцільні розрахункові терміни служби складають 300÷400 років. У відомчих нормах Укрзалізниці терміни служби бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій до їх заміни або перекладання уточнені: тунельних обробок – 30÷50 років, водопропускних труб – 100, мостових опор – 80÷100, прогонових споруд – 70÷90.

Разом з тим бетон має значно більші потенційні можливості за термінами служби, про що сві-



дчать стародавні споруди з нього, вік яких перевищує декілька тисячоліть. Це культові, меморіальні, палацові, фортифікаційні, гідротехнічні споруди Єгипту, Сирії, Кіпру, Греції, Італії. На наш погляд, таку довговічність цим спорудам наряду з мінеральним складом в'язучих надає їх форма, що виключає виникнення розтягнутих зон (піраміди, арки, склепіння), а також відсутність обводненості більшості з них (крім гідротехнічних).

В обводнених конструкціях і спорудах найбільшу руйнівну дію мають (крім поперемінного заморожування і відтавання) вилуговування при фільтрації води крізь бетон або його омиванні, біохімічна корозія та карбонізація (карбонатизація), що призводить до створення умов для біохімічної корозії. У різних частинах конструкцій знос бетону нерівномірний. При стисненні до певної межі бетон ущільнюється, а його стійкість до поперемінного заморожування і відтавання та агресивних середовищ підвищується. При розтягальних напругах у бетоні його стійкість швидко зменшується.

Згідно з літературними даними для вилуговування при омиванні бетону м'якою водою або її фільтрації застосовуються лише наближені розрахунки довговічності за допустимою кількістю вапна, що виноситься водою. При цьому розглядають механізми його дифузійного або фільтраційного виносу. У дисертації показані недостатня відповідність цих механізмів дійсним і необхідність врахування осмотичного і капілярного тиску, безнапірної водопроникності бетону.

Для бетону таких обводнених конструкцій, як каналізаційні колектори, агресивними газами є  $CO_2$ ,  $H_2S$ , з участю яких відбуваються карбонізація, біохімічна корозія. Вважають, що карбонізація обмежується дифузією  $CO_2$  в газовій фазі бетону. У літературі наведені відповідні описання механізму і формули для оцінки довговічності залізобетонних конструкцій, в яких визначальними характеристиками є ефективний коефіцієнт дифузії  $CO_2$  і товщина захисного шару. Проте цей механізм справедливий для нормальних умов на повітрі. В умовах однобічного обводнення конструкції  $CO_2$  дифундує в бетон через мікро- і макрокапіляри, заповнені водою, при цьому процес протікає набагато (кілька порядків) повільніше і карбонізація, як вважають, не є небезпечною.

За думкою фахівців, таких знань про механізм біохімічної корозії каналізаційних колекторів з бетону недостатньо. Це, на наш погляд, є головною причиною руйнування цих і подібних споруд і відсутності ефективних недорогих способів забезпечення їх довговічності. При цьому викликає сумніви пояснення швидкого (у середньому за 12 років) руйнування багатьох колекторів за рахунок тільки дії кислого середовища тіонових бактерій. Аналіз робіт з механізму виборчої адсорбції біологічними клітинами неорганічних речовин дав підставу вважати, що розвиток уявлень про механізм біохімічної корозії можливий на основі розвитку уявлень про електроповерхневі властивості і взаємодію клітин тіонових бактерій з цементним каменем.

Як відомо, в основі біохімічної корозії безнапірних колекторів лежить окислення сполук сірки до сірчаної кислоти тіоновими бактеріями. Виконаними термодинамічними розрахунками підтверджено, що основним з таких сполук є  $H_2S$ , який випаровується зі стоків, потрапляє на вологі

стілки вище рівня води і біохімічно окислюється до сірчаної кислоти, яка спричиняє руйнування бетону, у тому числі з утворенням гіпсу та еtringіту. Бетон має дуже лужне середовище з  $pH > 12$ , при якому не заселяється жоден вид бактерій, що викликають корозію. Тому умовою прояву біохімічної корозії є її поєднання з нейтралізацією бетону в результаті дії кислих газів (у тому числі карбонізації). З урахуванням цього і виконаного аналізу виділено три основні стадії формування біологічно активного корозійного середовища каналізаційних колекторів і подібних споруд: зниження  $pH$  до 9 і створення сприятливих умов для бактерій виду *Thiobacillus thioararus*; метаболізм *T.thioararus*, який приводить до зниження  $pH$  до 4÷5 і створення сприятливих умов для бактерій виду *T.thiooxidans*; метаболізм *T.thiooxidans*, який приводить до зниження  $pH$  до 0,6÷1.

**Четвертий розділ** присвячений розвитку теоретичних уявлень про структуру і довговічність бетону за міцністю, деформівністю, водопроникністю в конструкціях на основі загальних положень фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів та інших наук. При цьому проаналізовані та в певному ступені використані відомі в цих областях роботи Й.М.Ахвердова, В.І.Бабушкіна, О.Г.Вандоловського, Є.І.Ведя, В.М.Вирового, В.А.Вознесенського, В.Д.Глуховського, І.Г.Гранковського, І.М.Грушка, Б.В.Гусева, Л.Й.Дворкіна, В.В.Ілюхіна, В.В.Капранова, П.Г.Комохова, О.В.Кондращенко, П.В.Кривенка, М.М.Круглицького, В.Лаха, В.А.Матвієнка, О.П.Мчедлова-Петросяна, Ф.Д.Овчаренка, Ю.І.Орловського, Т.Пауерса, А.М.Плугіна, В.М.Пунагіна, В.Рамачандрана, В.Б.Ратінова, Ш.М.Рахімбаєва, П.О.Рєбіндера, Н.М.Руденко, Р.Ф.Рунової, М.А.Саницького, В.І.Соломатова, О.О.Старосельського, Х.Тейлора, В.Ю.Третинника, О.В.Ущерова-Маршака, А.С.Файвусовича, Д.А.Фридрихсберга, В.В.Чистякова, О.Є.Шейкіна, Л.Г.Шпинової, Й.Штарка, Є.Д.Щукіна, J.J.Beaudoin, E.E.Bodor, S.Brunauer, V.Collepari, S.Diamond, P.K.Mehta, P.Z.Pratt, J.Skalny, R.Trettin, O.Wagner, S.Wild та ін.

На основі виконаних спільно з О.Г.Холодним електронно-мікроскопічних досліджень уточнені уявлення про колоїдно-хімічну природу бетону, згідно з якою він є поліструктурним із чотирма рівнями структури – макро-, мезо-, мікро- і субмікро-, які визначаються розмірами структуроутворюючих елементів, відповідно: зерен крупного і дрібного заповнювачів – 2,5÷25 і 0,2÷0,5 мм, відповідно; реліктових частинок цементу – 10÷50 мкм; субмікросталічних частинок кристалогідратів – 250÷500 нм і глобул гідросилікатного гелю – до 100 нм, які є агрегатами частинок гелю розміром до 10 нм. На мікроскопічному рівні частинки кристалогідратів і глобули гелю утворюють структуру продуктів гідратації цементу традиційно прийнятої морфології. Структуроутворюючі елементи утворюють систему пор, яка складається з пор гелю розміром до 10 нм, мікрокапілярів – 10÷100 нм і макрокапілярів – 100÷1000 нм. Дисперсійним середовищем у такій полідисперсній системі є розчин  $Ca(OH)_2$  концентрацією  $\approx 0,02$  моль/л,  $pH \approx 12$ .

З урахуванням висловленого розроблені схеми структури бетону на вказаних рівнях, які дають

наочне уявлення про взаємодії між структуроутворюючими елементами. Значний внесок у ці взаємодії вносять електроповерхневі властивості, у тому числі: електроповерхневий потенціал  $\psi^0$ , В, рівноважний електроповерхневий потенціал  $\psi_p^0$ , В, поверхнева густина заряду  $q^0$ , Кл/м<sup>2</sup>, концентрація зарядів – потенціалвизначальних іонів (ПВІ) на поверхні  $n^0$ , 1/м<sup>2</sup>, відстань між цими зарядами  $a$ , м, а також характеристики пов'язаного з ними подвійного електричного шару (ПЕШ).

Для розширення уявлень про природу і величини  $\psi^0$  дано його енергетичне трактування, згідно з яким для простих речовин цей потенціал обумовлений енергетичним станом електронів зовнішніх орбіталей поверхневих атомів. Кожний з них прагне піти з поверхневого атома під дією енергії Фермі  $E_f$ , але утримується потенційною енергією відносно ядра  $E_n$ . При  $E_f > E_n$  це обумовлює позитивний заряд поверхні, при  $E_f < E_n$  – негативний. Величини  $\psi^0$  визначаються різницею  $E_f$  і  $E_n$ . Виконаний енергетичний розрахунок  $\psi^0$  показав близькість цих величин до відповідних величин, визначених А.М.Плугінім розрахунково-експериментальним методом за даними про стандартні електродні потенціали. Це свідчить про єдність їх природи і коректність визначення.

З урахуванням висловленого в подальших розрахунках використовуються такі уточнені значення величин і знаків електроповерхневих потенціалів складових цементу і бетону:  $SiO_2$  – електроповерхневий потенціал  $\psi^0 = -0,55$  В, рівноважний електроповерхневий потенціал при рН = 7  $\psi_p^0 = -0,96$  В, при рН=12 (у складі бетону)  $\psi_p^0 = -1,26$  В, тобто завжди негативні. Для портландцементу і його мінералів знак  $\psi^0$  – позитивний. У водному середовищі при рН=12 потенціали силікатів є негативними і лише у  $C_3A$  він залишається позитивним.

Для прогнозування довговічності бетону в обводнених умовах, у тому числі за його тріщиностійкістю і корозійною стійкістю, важливо знати достовірні величини  $\psi^0$  і  $\psi_p^0$  при рН = 12  $Ca(OH)_2$  і гидросилікатів кальцію (ГСК):  $Ca(OH)_2$  –  $\psi^0 = +1,24$  В,  $\psi_p^0 = +0,53$  В; ГСК ( $CSH$ ) –  $\psi^0 = +0,29$  В,  $\psi_p^0 = -0,37$  В. При зниженні рН рівноважний потенціал ГСК змінює знак на позитивний.

При розгляді механізму біохімічної корозії бетону важливими також є дані про  $\psi^0$  і  $\psi_p^0$   $CaCO_3$ . Розраховане для нього значення  $\psi^0 = +1,26$  В відрізняється від експериментальної величини електродкінетичного потенціалу  $\zeta = 0,003$  В. Це викликає необхідність експериментальної перевірки  $\psi^0$   $CaCO_3$ , портландцементу і, для порівняння, –  $SiO_2$ .

Густина поверхневого заряду потенціалвизначальних іонів (ПВІ)  $q^0$ , Кл/м<sup>2</sup>, і протиіонів (ПІ)  $q_1$ , Кл/м<sup>2</sup>, пов'язана з різницею потенціалів ( $\psi^0 - \psi_1$ ), В, виразом

$$q^0 = -q_1 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 (\psi^0 - \psi_1)}{4\pi d_1}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_1$  – діелектрична проникність щільної частини ПЕШ;  $d_1$  – відстань між шарами ПВІ і ПІ при їх

специфічній адсорбції, м.

У дифузному шарі потенціал  $\psi$  змінюється експоненційно в залежності від відстані  $x$  від поверхні (шару III) згідно з рівнянням:

$$\psi = \psi_1 \cdot \exp(-x/\delta). \quad (2)$$

Товщина дифузного шару  $\delta$  залежить від концентрації електроліту в об'ємі рідкої фази. У цементному тісті і цементному камені величина  $\delta$  порівнянна з товщиною шару води  $\delta_{aui}$  на частинках гідросилікатного гелю і залежить від  $V/C$ . Виведені відповідні рівняння, за якими при  $V/C = 0,4$  в цементному тісті і бетонній суміші  $\delta_{aui} = 1,33$  мкм, а в цементному камені і бетоні  $\delta_{aui} = 3,5$  нм.

Величини  $n^0$  і  $a$  визначаються рівняннями:

$$n^0 = \frac{q^0}{ze} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 (\psi^0 - \psi_1)}{4\pi d_1 ze} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 \psi^0}{4\pi d_1 ze} \left[ \frac{\text{Кл/м}^2}{\text{Кл}} = 1/\text{м}^2 \right], \quad (3)$$

$$a = \sqrt{1/n^0}, \left[ \sqrt{1/(1/\text{м}^2)} = \text{м} \right]. \quad (4)$$

У табл.1 наведені результати розрахунків величин  $n^0$  і  $a$ . Результати розрахунків співпали з експериментальними даними про концентрацію активних центрів на поверхнях  $SiO_2$  (дані А.Ф.Кисельова),  $NaCl$  (дані електронно-мікроскопічного декорування Г.І.Дістлера), а також кристалогідратів (власні електронно-мікроскопічні дослідження). Це дозволяє оцінювати взаємодії між структурними елементами через одиничні зв'язки між їх ПВІ.

Таблиця 1

Електроповерхневі властивості  $NaCl$  і складових бетону

Характеристика	Одиниця вимірювань	Величина для речовин			
		$NaCl$	$SiO_2$	$Ca(OH)_2$	$CSH$
$\psi^0 (\psi_p^0)$	В	0,42	-0,55	0,54	-0,37
$n^0$	$1/\text{м}^2 \times 10^{-15}$	6,63	4	9,9	8,6
$a$	нм	12,3	6	10,2	10,8

З урахуванням розглянутої колоїдно-хімічної природи бетону і основ електрогетерогенного твердіння цементних в'язучих розвинута кількісна теорія міцності цементного каменю. При цьому розроблені вдосконалені схеми електрогетерогенних контактів (ЕГК) у цементному камені і бетоні, що визначають їх міцність (рис.1). Як одиничний прийнятий парний контакт між ПВІ частинки кристалогідрату  $Ca(OH)_2$  і ГСК з молекулою води між ними (рис.1, б). Сила зв'язку  $P_{ек}$  в такому одиничному парному контакті визначається законом Кулона з урахуванням іон-іонної та іон-дипольних взаємодій. Згідно з фізико-хімічною теорією міцності дисперсних систем Ребіндера – Щукіна міцність цементного каменю при розтяганні  $R_t^{ук}$ , Па, визначається міцністю ЕГК  $R_t^{ек}$ , Па, а також поверхневою часткою (долею у відн.од.) ЕГК  $\gamma_s^{ек}$  і поверхневою концентрацією ПВІ  $n^0$  на кристалогідратах:

$$R_t^{чк} = R_t^{екк} \cdot \gamma_s^{екк} = P_{екк} \cdot n^0 \cdot \gamma_s^{екк}, [Н \cdot л / м^2 = Па]. \quad (5)$$

Величина  $\gamma_s^{екк}$  визначається рівнянням

$$\gamma_s^{екк} = \gamma_s^к \cdot \gamma_s^2, \quad (6)$$

де  $\gamma_s^к$  – поверхнева частка кристалогідратів у поперечному перерізі (поверхні розриву) цементного каменю;  $\gamma_s^2$  – поверхнева частка гелю на поверхні кристалогідратів.

З урахуванням висловленого після ряду перетворень одержано вираз

$$R_t^{екк} = \frac{\varepsilon_1 z^- e(\psi_p^0)^+}{16\pi^2 \varepsilon_{екк} d_1 h^2} + \frac{\varepsilon_1 \mu_d z^- (\psi_p^0)^+}{4,44\pi^2 \varepsilon_\mu z^+ d_1 h_\mu^3} \left[ \frac{Кл \cdot В}{м \cdot м^2} + \frac{Кл \cdot м \cdot В}{м \cdot м^3} = \frac{Дж}{м^3} = \frac{Н}{м^2} = Па \right], \quad (7)$$

де перший член виражає іон-іонну взаємодію між ПВІ  $Ca^{2+}$  і  $OH^-$ , другий – іон-дипольні взаємодії між  $OH^-$  і диполями  $H_2O$ ;  $h$  – відстань між взаємодіючими ПВІ;  $h_\mu$  – відстань між ПВІ  $OH^-$  і диполем  $H_2O$ ;  $\mu_d$  – дипольний момент молекули води;  $\varepsilon_{екк}$  і  $\varepsilon_\mu$  – діелектричні проникності води в шарі між ПВІ і між ПВІ і диполем води.

Виражаючи  $\gamma_s^к$  і  $\gamma_s^2$  через масові частки у продуктах гідратації портландцементу кристалогідратів  $A$  і гелю  $B$ , отримали рівняння для  $R_t^{чк}$ :

$$R_t^{чк} = R_t^{екк} \gamma_{s1}^{екк} = 1,35 AB \alpha^u R_t^{екк} \cdot \frac{(Ц / B)^2}{0,29Ц / B + 3,1} \quad \text{– при } B/Ц \geq 0,23; \quad (8)$$

$$R_t^{чк} = R_t^{екк} \gamma_{s2}^{екк} = 25,8 AB \alpha^u R_t^{екк} \cdot \frac{1}{1,82Ц / B - 3,1} \quad \text{– при } B/Ц < 0,23. \quad (9)$$

Розрахункові міцності цементного каменю при стиску  $R$  в залежності від  $B/Ц$  при  $A = 0,57$ ,  $B = 0,65$ ,  $\alpha^u = 0,5$  і відповідні експериментальні дані наведені на рис.2. Як бачимо, ці величини і криві мають однаковий характер зміни і близькі значення. Значення  $B/Ц$  (рис.2), при якому виявляється максимальна міцність  $R$ , – оптимальне за міцністю  $(B/Ц)_{opt} = 0,23$ . При  $B/Ц < (B/Ц)_{opt}$  і  $B/Ц > (B/Ц)_{opt}$  величина  $R$  зменшується. Це пов'язано, відповідно, з дефіцитом води і виникненням пористості між частинками цементу, а також зменшенням вмісту частинок цементу і збільшенням пористості цементного каменю, відповідно, отже, в обох випадках зі зменшенням поверхневої частки ЕГК.

Добуток  $AB$  в рівняннях міцності (8) і (9) визначає поверхневу частку ЕГК. Кристалогідрати, у першу чергу  $Ca(OH)_2$ , є хімічно нестійкими структурними елементами, їх концентрація при корозії зменшується, тобто зменшується і частка ЕГК. Отже,  $B/Ц$  і  $AB$  ( $A/B$ ) є структурними характеристиками цементного каменю на мікро- і субмікрорівні, відповідно, що визначають довговічність за міцністю цементного каменю і бетону. Залежність цієї довговічності від  $A/B$  ( $K/\Gamma$ ), як розрахункова, так і експериментальна, має екстремальний характер (рис.3).

Довговічність конструкцій за деформаціями визначається довготривалою повзучістю цемент-

ного каменю і бетону. Згідно з розробленими уявленнями про її механізм стискуєче навантаження передається спочатку на гель і фізико-хімічно зв'язану в ньому воду. Пружні властивості частинок цементу і зерен заповнювачів, а також деформації гелю і видавлювання з нього води (визначає сутність релаксації) обумовлюють прояв цементним каменем, розчином і бетоном одночасно пружності, пластичності і текучості. Ступінь їх прояву, за А.А.Трапезніковим, визначається співвідношенням між тривалістю дії навантаження на тіло  $t$  і періодом його релаксації  $t_r$ . Це вимагає врахування різниці в прояві властивостей бетону при випробуванні на міцність і пружність ( $1 \div 2$  хв), коли проявляється пружність, і в умовах експлуатації (десятки років і більше), коли проявляється довготривала повзучість. Крім того,  $t_r$  цементного каменю або бетону залежить від їх безнапірної водопроникності та розмірів зразка або конструкції. Це вимагає також врахування масштабного фактора при оцінці тривалості повзучості бетону в лабораторних зразках і крупногабаритних конструкціях. Вплив масштабного фактора на кінетику деформацій бетону, оцінка якого виконана на основі дисперсно-фазової реологічної моделі ґрунту Терцагі, наочно демонструють графіки на рис.4.

Розкриття механізму довготривалої повзучості цементного каменю ґрунтувалося також на аналізі одержаних спільно з С.М.Кудренко експериментальних кінетичних кривих звичайної і довготривалої повзучості зразків-призм розміром  $100 \times 100 \times 400$  мм із цементного каменю природного твердіння з  $B/C = 0,4$  (рис.5). За цими кривими деформування цементного каменю протікає в чотирьох стадіях – умовно-пружна деформація, швидконатікаюча, звичайна і довготривала повзучість. При цьому повна гранична деформація  $\varepsilon^{ep}$  складається з відповідних граничних деформацій –  $\varepsilon^{ep} = \varepsilon_{yn}^{ep} + \varepsilon_{шн}^{ep} + \varepsilon_{zn}^{ep} + \varepsilon_{дн}^{ep}$ .

Лише фільтраційний механізм витискування води з гелю цементного каменю не відповідає жодній з цих стадій, у зв'язку з чим виконаний аналіз процесів деформування продуктів гідратації в прошарку між реліктовими частинками цементу і в міжзерновому об'ємі (пустотах) між ними. Прошарок при цьому представлений схемою (рис.6, а), яка відповідає одержаній R.Trettin електронній мікрофотографії частинок гідросилікатів кальцію на поверхні  $C_3S$  (рис.6, б).

За цією схемою на стадіях умовно-пружної деформації і швидконатікаючої повзучості стискуєча напруга в цементному камені  $\sigma$  передається на продукти гідратації цементу і приводить до зближення частинок гелю і перекриття їх ПЕШ до рівноважного стану (рис.7), який визначається рівністю зростаючого розклинювального тиску (сума електростатичної  $P_{ec}$  і структурної  $P_{cm}$  складових) цій напрузі  $\sigma$ . При цьому ПШ разом з гідратованою ними водою із стиснутих ПЕШ дифундують у пустоти між частинками і глобулами гелю. Кінетика деформацій на цій стадії визначається рівнянням дифузії Фіка і коефіцієнтом дифузії ПШ  $D_{ni}$ .

На стадії звичайної повзучості, зокрема її нелінійної стадії, відбувається руйнування глобул гелю в стиснутих прошарках між частинками цементу за рахунок електрофоретичного переносу

частинок гелю, з яких вони складаються (під дією потенціалу течії, утворюваного фільтрацією води, обумовленою стискувальною напругою), у міжзерновий об'єм частинок цементу і ущільнення прошарків. Кінетика деформацій на цій стадії визначається швидкістю електрофоретичного переносу частинок гелю.

Довготривала повзучість пов'язана з тим, що в стиснутих ПЕШ зростає концентрація ПІ (рис. 7) і, відповідно, виникає осмотичний тиск  $p_{oc} = \Delta cRT$ , який передається на воду в порах і капілярах, у тому числі розташованих у зонах контакту, і приводить до її витиснення зі зразка (зі стиснутої в розтягнуту зону конструкції). Це дозволяє оцінювати виникаючий потік води як фільтрацію під дією  $p_{oc}$ , тобто як безнапірну водопроникність  $W_{\delta\delta}$ .

Безнапірна водопроникність  $W_{\delta\delta}$  здійснюється під дією основних складових внутрішнього тиску: осмотичного  $p_{oc}$ , капілярно-осмотичного  $p_{ко}$ , капілярного підняття  $p_{кп}$ , електрокапілярного  $p_{ек}$ . За результатами досліджень характерна крива безнапірної водопроникності (фільтрації)  $W_{\delta\delta}$  цементного каменю (або бетону)  $dV/d\tau = W_{\delta\delta}S$  наближається до ламаної, на якій виділяються 4 практично лінійні ділянки з трьома точками перелому (рис. 8). За виглядом крива безнапірної водопроникності подібна кривій довготривалої повзучості (рис. 5). Тиски  $p_{кп}$ ,  $p_{ек}$  і  $p_{ко}$  діють тільки в період водонасичення зразка на 1, 2 і 3 ділянках кривої. Осмотичний потік води крізь зразок під дією  $p_{oc}$  на 3-й ділянці здійснюється порами між частинками гелю, а на 4 – між глобулами. Менша пустотність глобул (за рахунок меншого обводнення) пояснює меншу величину  $W_{\delta\delta}$  на 4-й ділянці (рис. 8).

З урахуванням висловленого механізм безнапірної водопроникності полягає у встановленні стаціонарного потоку води через капіляри (пори) гелю під дією осмотичного тиску води  $p_{oc}$  і сил тертя води об стінки капілярів. При цьому рівняння для безнапірної водопроникності має вигляд

$$W_{\delta\delta} = \frac{p_{oc} \Pi_{ус}^{\mu\kappa} \delta_{аиш} \cdot \left( \frac{1}{\rho^{\mu}} + \frac{1}{\rho^{\delta}} \cdot \frac{B}{\Pi} \right)}{\eta l_{\phi} \alpha^{\mu} \gamma^{\delta} s^2}, \quad \text{де} \quad \delta_{аиш} = \frac{B/\Pi - 0,12}{\rho^{\delta} \alpha^{\mu} \gamma^{\delta} s^2}. \quad (10)$$

Виражаючи пустотність (пористість) цементного каменю  $\Pi_{ус}^{\mu\kappa}$  через обводненість глобул і частинок гелю ( $Обв^{г.л.}, Обв^{\delta} = V^{г.л.,\delta} / V^{ог.л.,oc}$ ), виведено відповідні рівняння для цих характеристик. Розрахункові (для зразків розміром  $10 \times 10 \times 10$  см із цементного каменю з  $B/\Pi = 0,23 \div 0,4$ ,  $p_{oc} = 5 \times 10^4$  Па та ін.) та експериментальні величини  $W_{\delta\delta}$  виявилися близькими, що дозволяє використовувати їх для оцінки тривалості відповідних стадій повзучості.

За рівняннями безнапірної водопроникності та осмосу виведені рівняння для тривалості звичайної і довготривалої повзучості зразка-призми розміром  $a \times a \times h$  (з урахуванням середньої площі потоку витискування води  $s = (a/2)^2$ ):

$$t_{zn} = \frac{4h \alpha^{\mu} \gamma^{\kappa} \Pi_{ор}^2 l_{\phi}}{\rho^{\delta} \cdot \left( \frac{1}{\rho^{\mu}} + \frac{1}{\rho^{\delta}} \cdot \frac{B}{\Pi} \right) \cdot W_{\delta\delta} p_{oc}}; \quad t_{on} = \frac{4hl_{\phi} \cdot \left( \frac{1}{\rho^{\delta}} \cdot \frac{B}{\Pi} - \frac{0,23\alpha^{\mu}}{\rho^{\delta}} - \frac{\alpha^{\mu} \gamma^{\kappa}}{\rho^{\delta}} \right)}{\left( \frac{1}{\rho^{\mu}} + \frac{1}{\rho^{\delta}} \cdot \frac{B}{\Pi} \right) \cdot W_{\delta\delta} p_{oc}}. \quad (11)$$

За результатами розрахунків, виконаних за цими рівняннями для призми з цементного каменю розміром  $10 \times 10 \times 40$  см при  $B/C = 0,4$ , і відповідних даних тривалість деформування складає  $t_{zn} = 103$  доби і  $t_{dn} = 1140$  діб, що узгоджується з експериментальними даними (рис.5) і свідчить про коректність рівнянь (11). Як і для тривалості, граничні деформації стиснення цементного каменю визначаються рівністю напруги  $\sigma$  сумі складових розклинювального тиску  $P_{ec}$  і  $P_{cm}$ , у тому числі його значень початкового і після стиснення.

Граничні деформації повзучості залежать від різниці між товщиною шару води у вихідному і стиснутому станах  $\Delta\delta_{aui} = \delta_{aui}^{six} - \delta_{aui}^{cm}$

$$\Delta\delta_{aui} = \frac{\left(\frac{B}{C} - 0,23\alpha^u\right) \varepsilon_1 \varepsilon_0 (\psi_p^0)^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2\varepsilon_1} + \frac{U_z^{OH^-}}{e\psi_p^0 z^{OH^-}} + \frac{2U_z^{Ca^{2+}}}{e\psi z^{Ca^{2+}}}\right)}{\rho^6 \alpha^u \gamma^e s^u} - \frac{4\pi d (P_{cm}^{six} + \sigma)}{4\pi d (P_{cm}^{six} + \sigma)}, \quad (12)$$

де  $U_z^{OH^-}$  і  $U_z^{Ca^{2+}}$  – енергія гідратації ПВІ  $OH^-$  і ПІ  $Ca^{2+}$  ПЕШ частинок гелю.

З урахуванням цього виразу для відносної деформації обводненого гелю і граничної деформації цементного каменю на стадіях умовно-пружної деформації і швидконатікаючої повзучості приймають вигляд, відповідно:

$$\varepsilon_2^{yn,un} = \frac{2\Delta\delta_{aui}}{d^e + 2\delta_{aui}^{six}}, \quad \varepsilon_{yn,un}^{ep} = \frac{2\Delta\delta_{aui}}{d^e + 2\delta_{aui}^{six}} \cdot \gamma^e \cdot \frac{2\delta_2^{six}}{d^u}, \quad (13)$$

де  $\delta_{aui}^{six} = (B/C - 0,23)/\rho^6 s^u$ ;  $2\Delta\delta_{aui}$  – зменшення товщини прошарку води між частинками гелю при стисненні ПЕШ;  $d^e, d^u$  – середні діаметри частинок гелю і цементу.

На стадії довготривалої повзучості  $\sigma$  передається через частинки цементу на гідратні новоутворення в об'ємі між цими частинками і, відповідно, на ПЕШ частинок гелю в об'ємі (об'ємний гелю). При цьому зменшення товщини шарів води гелю в об'ємному гелю відбувається до такої ж величини  $\Delta\delta_{aui}$ , як і в прошарках новоутворень, з урахуванням чого повна гранична деформація цементного каменю в кінці стадії довготривалої повзучості визначиться виразом

$$\varepsilon^{ep} = \frac{2\Delta\delta_2^{dn}}{d^u} = \frac{2\alpha^u \gamma^e s^e \Delta\delta_{aui}}{3s^u d^u}. \quad (14)$$

Одержані за формулами (13) і (14) розрахункові величини наближаються до експериментальних (рис.5 та ін.), що свідчить про коректність цих рівнянь.

Деформації на стадії умовно пружної деформації і швидконатікаючої повзучості є такими, що багато разів повторюються, тобто виявляються кожного разу, наприклад, при проходженні мостом потяга. Разом з граничною деформацією довготривалої повзучості вони дозволяють оцінювати довговічність проговоної споруди як від статичних, так і динамічних навантажень.

Деформації бетону обумовлені деформаціями цементного каменю в прошарках між зернами заповнювачів, що враховується коефіцієнтами розсунення зерен піску  $\mu$  і щебеню  $\alpha$ . У зв'язку з



цим граничні деформації і тривалість повзучості бетону визначаються виразами

$$\varepsilon^b = \varepsilon^{чк} \cdot \sqrt[3]{\left(1 - \frac{\mu_{onm}}{\mu}\right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{onm}}{\alpha}\right)}; \quad \tau^b = \tau^{чк} \cdot \sqrt[3]{\left(1 - \frac{\mu_{onm}}{\mu}\right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{onm}}{\alpha}\right)}. \quad (15)$$

Дотримання в бетоні величин  $\mu_{onm}$  і  $\alpha_{onm}$  забезпечує його тріщиностійкість, мінімальні деформаційність і водопроникність за рахунок найщільніших упаковок зерен піску між зернами щебеню і частинок цементу між зернами піску.

Довготривала повзучість бетону має істотний вплив на напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій, що згинаються, і може привести до зниження довговічності цих конструкцій за тріщиностійкістю. Умова тріщиностійкості полягає в тому, що тріщини в перерізах, нормальних до поздовжньої осі, не утворюються, якщо момент зовнішніх сил не перевершує момент внутрішніх зусиль перед утворенням тріщин ( $M \leq M_{crc}$ ). У роботі наведені схеми і рівняння для  $M_{crc}$ , за допомогою яких показано, що повзучість збільшує висоту стиснутої зони  $x$  і знижує момент  $M_{crc}$ , а отже, тріщиностійкість. Крім того, повзучість бетону в стиснутій зоні приводить до додаткового вигину залізобетонних конструкцій, що також знижує їх тріщиностійкість.

**П'ятий розділ** містить результати теоретичних досліджень механізму і прогнозування корозійної стійкості бетону. Розвиваючи уявлення про механізм корозії I виду (вилуговування) при фільтрації води крізь бетон, розроблено новий спосіб прогнозування терміну служби обводнених бетонних і залізобетонних конструкцій при такій корозії. За основу прийнято рівняння фільтрації, в якому об'єм  $V_{об}$  води, що протікає крізь одиницю об'єму бетону, визначається за кількістю води, необхідною для розчинення кристалогідратів  $Ca(OH)_2$ , утворюючих ЕГК, а вода протікає крізь бетон під дією зовнішнього гідростатичного і осмотичного тиску  $p = (p_h + p_{oc})/\rho^g g$ :

$$K_\phi = \frac{V_{об} l_\phi^2}{\tau \cdot p} = \frac{K_{ван} \zeta \alpha_{CaO} l_\phi^2}{c_{ван} \cdot \tau \cdot p}, \quad (16)$$

де  $\alpha_{CaO}$  – масова частка в цементі  $CaO$ ;  $c_{ван}$  – розчинність вапна.

У такому вигляді рівняння прийнятне для нормування коефіцієнта фільтрації  $K_\phi$  бетону конструкцій. При цьому максимально допустима для вилуговування частка вапна  $K_{ван}$ , на відзнаку від прийнятої в літературі емпірично, обґрунтована кількісно, виходячи з допустимого зменшення міцності і, відповідно, частки ЕГК. Так, відношення розрахункового опору бетону до нормативного за СНиП 2.03.01, для бетону класу В40 тунельної обробки складає  $R_p/R_n = 22/29 = 0,76$ . За рис.3, б зниженню максимальної міцності 44МПа на таку величину відповідає міцність  $0,76 \times 44 = 33$  МПа. Такому зниженню міцності за рис.3, б відповідає зменшення  $K/\Gamma$  від 0,86 до 0,68, отже,  $K_{ван} = (0,86 - 0,68)/0,86 = 0,33$ .

Підставивши у формулу (16)  $l_\phi = 20$  см (товщина обробки тунелю) і решту даних, характерних для бетону з витратою цементу  $\zeta = 0,35$  т/м<sup>3</sup>, отримали величину  $K_\phi = 8,4 \times 10^{-8}$  см/с, що відповідає

реальній.

Для практичного застосування такого способу зручніше нормувати величину безнапірної водопроникності бетону  $W_{\sigma\epsilon} = (dV/d\tau)/S$  (рис.8) з її експериментальним визначенням для зразка бетону  $10 \times 10 \times 10$  см або іншого, відібраного з конструкції. Прогнозований термін служби бетону в конструкції при цьому складе

$$\tau = \frac{V_{\sigma\epsilon} \cdot l_{\phi\kappa}}{W_{\sigma\epsilon} \cdot l_{\phi\pi}} \left[ \frac{(cm^3 / cm^3) \cdot cm}{(cm / c) \cdot cm} = c \right], \quad (17)$$

де  $l_{\phi\kappa}$  і  $l_{\phi\pi}$  – товщина (шлях фільтрації) конструкції і зразка, відповідно.

Підставляючи реальні граничні величини  $W_{\sigma\epsilon} = 1 \cdot 10^{-8}$  і  $1 \cdot 10^{-6}$  см/с, отримаємо  $\tau = 6,7 \cdot 10^7$  с = 2,1 року і  $\tau = 6,7 \cdot 10^8$  с = 210 років, відповідно, що відповідає реальним, як украй низьким, так і тривалішим термінам служби бетону при корозії вилуговування.

В основу розвитку уявлень про механізм вилуговуванням при омиванні конструкції водами з низькою гідрокарбонатною жорсткістю покладені рівняння фільтрації води в бетон під дією осмотичного тиску і дифузії продуктів розчинення. Рівняння для довговічності шару бетону завтовшки  $x$  має вигляд

$$\tau = \frac{Cx}{D\Delta c S \rho^s} = \frac{Cx}{D\Delta c S \cdot \sqrt[3]{(B/C - 0,23\alpha^u) \cdot C / \rho^6}}^2. \quad (18)$$

За формулою (18) довговічність шару бетону завтовшки  $x = 1$  см (при  $C = 400$  кг/м<sup>3</sup>,  $D = 1,5 \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с,  $S = 1$  см<sup>2</sup>) дорівнює  $\tau = 127$  років (для  $B/C = 0,32$ ) і  $\tau = 48$  років ( $B/C = 1$ ). Фактично процес руйнування може відбуватися ще швидше, прогресуючи за рахунок збільшення пористості при вилуговуванні бетону.

В основу розвитку уявлень про механізм карбонізації покладено рівняння дифузії Фіка і швидкості дифузійного перенесення карбонат-іонів у водному розчині. Підсумкове рівняння для тривалості карбонізації на глибину  $x$  має вигляд

$$\tau = \frac{2,57 \cdot 10^{-3} \cdot x^2}{D\Delta c \rho^s}. \quad (19)$$

За цим рівнянням розрахункова довговічність  $\tau$  захисного шару завтовшки 1см складе  $80 \div 160$  років для бетонів з  $B/C = 1 \div 0,32$ , відповідно. Слід чекати, що дійсні величини  $\tau$  виявляться нижчими, оскільки по мірі поглиблення корозії зменшується лужність середовища і збільшується розчинність  $CaCO_3$ . Це свідчить про те, що карбонізація небезпечна для обводнених конструкцій.

Розвиток уявлень про механізм біохімічної корозії бетону здійснено на основі уявлень про електроповерхневі явища в дисперсних системах і найглибших робіт з мікробіології Є.І.Андреюк, М.В.Гусева, Д.Г.Звягінцева, Л.Рубенчик, І.Н.Чурбанової, В.О.Юрченко, Г.Н.Booth, A.Rigdon та ін. Біохімічна корозія обводнених залізобетонних конструкцій, зокрема каналізаційних колекторів,

обумовлена дією тіонових бактерій (рід *Thiobacillus*). На рис.9, *a* наведено електронно-мікроскопічний знімок бактерії виду *Thiobacillus thioeparus* (*T.thiooxidans* схожі на них), а на рис.9, *б* – загальну схему грамнегативних прокариот, якими є тіонові бактерії. Розміри клітин бактерій порівнянні з частинками кристалогідратів і гелю цементного каменю. Як видно із рис.9, контакт клітини з цементним каменем здійснюється через клітинну стінку, зокрема її зовнішню мембрану.

Зовнішня мембрана складається в основному з білків і ліпідів. Білки є об'єктом колоїдної хімії і характеризуються електроповерхневими властивостями, визначеними наявністю в них аміногруп і карбоксильних груп. Дисоціація цих груп приводить до створення ПЕШ. При цьому амінні групи  $R-NH_3^+ \dots OH^-$  приводять до придбання білками позитивного заряду, а карбоксильні  $R-COO^- \dots H^+$  – негативного, що визначає амфотерність білків зі зміною знаку інтегрального поверхневого заряду  $q^0$  і електроповерхневого потенціалу  $\psi_p^0$  під час переходу через ізоелектричну точку при  $pH = 4,7$ . Отже, білкові ділянки на поверхні клітин бактерій *T.thioeparus*, активних при  $pH = 4 \div 8$ , заряджені негативно, а *T.thiooxidans*, активних при  $0,6 \div 4,3$ , – позитивно. Ліпіди, зокрема фосфоліпіди, мають гідрофобні або негативно заряджені ділянки поверхні.

Цитоплазматична мембрана (ЦПМ) містить білки, ліпіди і деяку кількість вуглеводів. За П.Мітчелом, протони переносяться через мембрану в одному напрямі, створюючи градієнт концентрації  $H^+$  по обидва боки мембрани. У результаті виникає трансмембранний потенціал  $\Delta\psi_{H^+}$  величиною до 300 мВ.

Цитоплазма є полідисперсною, що містить молекули простих органічних речовин, в основному кислот та їх солей і утворень з них – амінокислот, мононуклеотидів, вищих жирних кислот, гліцерину, простих цукрів (високодисперсна фаза), а також частинки високомолекулярних сполук – нуклеїнових (ДНК) і рибонуклеїнових (РНК) кислот, білків, ліпідів, полісахаридів, поліфосфатів (грубодисперсна фаза). Вони дисоціюють на іони  $H^+$  (або  $K^+$ ) і органічні аніони з активними групами на поверхні – карбоксильними  $-COO^-$ , сульфатними  $-SO_3^{2-}$ , фосфатними  $-PO_3^{2-}$  (а також амінними  $-NH_3^+$ ). Здійснюється перенесення іонів  $H^+$  крізь ЦПМ з цитоплазми в периплазматичний простір, а колоїдні частинки (органічні аніони) залишаються в цитоплазмі. До грубодисперсної фази належать також молекули аденозинтрифосфорної кислоти, ферментів, коферментів, що забезпечують життєдіяльність клітин.

Таким чином, клітина *T.thiooxidans* містить значний негативний заряд усередині цитоплазми, обумовлений поверхневим зарядом її дисперсної, особливо високодисперсної фази, і такий же за абсолютною величиною позитивний заряд в периплазматичному просторі й зовні зовнішньої мембрани (рис.10, *a*). У цілому клітина є електронейтральною і у вільному стані центри негативного і позитивного зарядів співпадають. При контакті з цементним каменем клітина знижує  $pH$  його рідкої фази до  $0,65 \div 1$  і менше (*T.thiooxidans*). При цьому гідросилікати кальцію набувають позитивний заряд, а потім, як і  $Ca(OH)_2$ , розкладаються з утворенням позитивно зарядженого гіпсу внаслідок вза-

ємодії з іоном  $SO_4^{2-}$ . У результаті перед клітиною тіонових бактерій знаходяться частинки з позитивними ПВІ на їх поверхні і негативними ПП з боку рідкої фази. Між клітиною і цими частинками виникає електрогетерогенна взаємодія, яка приводить до її поляризації, тобто зсуву дисперсної фази цитоплазми та її самої у бік новоутворень цементного каменю (рис.10, б).

Корозія підтримується за умови винесення продуктів розчинення (іонів і молекул) за межі бетону (у середовище). Встановлені можливі руйнівні сили перенесення іонів, молекул, а також клітин бактерій, наведені відповідні рівняння і виконані розрахунки швидкості і тривалості перенесення. Встановлено, що тривалість корозії від тіонових бактерій визначається двома її стадіями – дифузією іонів  $H^+$  углиб бетону, а потім електрофоретичним прониканням клітин у бетон. Висока інтенсивність біохімічної корозії, у порівнянні з іншими видами, обумовлена дуже низьким рН (до 0,5) корозійного середовища і високою швидкістю електрофоретичного перенесення клітин углиб бетону.

При цьому рівняння тривалості  $\tau$  дифузії іонів  $H^+$  в бетон на глибину  $x$  при  $C = 0,3$  г/см<sup>3</sup>,  $\gamma^{C3S} = 0,6$ ,  $\gamma^k = 0,4$ ,  $\alpha^u = 0,5$ ,  $D^{H^+} = 1,5 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с має вигляд

$$\tau = \frac{C \gamma^{C3S} \gamma^k \alpha^u x^2}{M^{CaO} D^{H^+} \Delta c^{H^+} Por^s} = \frac{42,8x^2}{\Delta c^{H^+} Por^s} = \frac{42,8x^2}{\Delta c^{H^+} \sqrt[3]{C \cdot (B/C - 0,23\alpha^u)}}^2 \text{ с}, \quad (20)$$

а тривалості  $\tau$  електрофорезу клітин у бетон на глибину  $x$ :

$$\tau = \frac{1,71 \cdot 10^6 \cdot x}{Por^s} = \frac{1,71 \cdot 10^6 \cdot x}{\sqrt[3]{C \cdot (B/C - 0,23\alpha^u)}}^2. \quad (21)$$

Як бачимо,  $B/C$ , яке визначає пористість цементного каменю, має значний вплив на кінетику біохімічної корозії. На швидкість корозії істотний вплив має швидкість винесення  $Ca(OH)_2$ , який, розчиняючись, звільняє місце для просування клітин у бетон. Це винесення найбільш інтенсивно відбувається при наявності ґрунтових вод зовні колектора. У цьому випадку винос відбувається за рахунок фільтрації води під дією  $p_{oc}$ . При цьому потік фільтрації переміщується назустріч фронту корозії. Оскільки на прокородованій ділянці бетон має вкрай високу водопроникність, ділянка бетону з початковою водопроникністю весь час скорочується на величину  $x$ . З урахуванням цього тривалість винесення продуктів розчинення визначається рівнянням

$$\tau = \frac{66,1x^2}{K_{\phi} \cdot (1 - x/\delta_{cm}) \cdot p_{oc}}. \quad (22)$$

Кінетичні криві розглянутих корозійних процесів наведені на рис.11. Розрахунки за (20)÷(22) і аналіз цих кривих показали, що для всіх бетонів на початку процесу біохімічної корозії лімітуючими є стадії дифузії іонів  $H^+$  і винесення продуктів розчинення кристалогідратів, а потім, по мірі поглиблення корозії – електрофоретичного перенесення клітин. Цей висновок підтверджується даними натурних обстежень колекторів, що кородують (рис.11, б). Виконані дослідження показали, що каналі-

заційні колектори з товщиною стінки до 20 см із цементного бетону не можуть мати високих термінів служби навіть при застосуванні бетонів особливо низької проникності (високих марок з водонепроникності) та вимагають вторинного захисту або виконання з інших конструктивних матеріалів.

У шостому розділі наводяться результати експериментального підтвердження основних теоретичних уявлень про довговічність бетону, а також розробляються нові принципи визначення складів бетону для обводнених конструкцій.

Для експериментальної перевірки електроповерхневих властивостей речовин удосконалено способи вимірювань у високовольтному електричному полі та адсорбції колірних індикаторів. До удосконалення ці способи дозволяли визначити лише знак заряду частинок речовини, а після удосконалення – і його величину. Результати вимірювань для кварцу, кальциту наведені в табл.2. Як бачимо, зміряні і розрахункові дані близькі, що свідчить про достовірність величини потенціалу кальциту  $\psi_0 = +1,26 \text{ В}$  та ін. і коректність розроблених уявлень і залежностей, що ґрунтуються на цих величинах.

Перевірка достовірності уявлень про механізм безнапірної водопроникності виконана експериментально за допомогою приладу і способу визначення безнапірної водопроникності на зразках  $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$  з цементного каменю з  $B/C = 0,4, 0,26$  і  $0,23$ . Експериментальні і розрахункові величини  $W_{\text{бв}}$ , наведені в табл.4, близькі, що підтверджує достовірність вказаних уявлень.

Таблиця 2

Експериментальні і розрахункові величини  $\psi^0$  для кварцу, кальциту

Матеріал	Експериментальне значення $\psi^0$ , В, визначене:		Розрахунково-експериментальне значення $\psi^0$ , В
	адсорбцією індикаторів	у високовольтному полі	
Кварц $SiO_2$	-0,96	-0,43	-0,55
Кальцит $CaCO_3$	+1,26	+1,29	+1,26

Таблиця 3

Експериментальні і розрахункові величини  $W_{\text{бв}}$  цементного каменю

$B/C$	Розрахункове та експериментальне значення безнапірної водопроникності $W_{\text{бв}}$ , $\text{см/с} \times 10^8$ , відповідні стадії повзучості			
	звичайної		довготривалої	
	розрахункове	експериментальне	розрахункове	експериментальне
0,40	9,93	9,78	3,97	4,36
0,26	6,66	6,62	2,19	2,29
0,23	5,33	5,29	1,65	1,66

Особливістю довготривалої повзучості цементного каменю є залежність її деформацій від  $B/C$  і довжини шляху фільтрації води  $l_{\text{ф}}$  (розмірів зразків). Експериментальна перевірка цієї залежності

виконувалася на зразках-призмах  $10 \times 10 \times 40$  і  $4 \times 4 \times 16$  см з  $B/C = 0,4; 0,3$  і  $0,25$  (рис.12, а). Отримані експериментальні граничні деформації близькі до відповідних розрахункових. Підтверджена також залежність деформацій довготривалої повзучості цементного каменю від  $l_\phi$  і можливість урахування масштабного фактора для крупногабаритних конструкцій (рис.12, б, в).

Таким чином, експериментально підтверджена достовірність теоретичних уявлень про довговічність цементного каменю, розчину, бетону. Це дозволило розробити теоретичні передумови для визначення складів цементно-водних суспензій (ЦВС), розчинів і бетонів, оптимальних за рухливістю, міцністю і довговічністю.

Текучість ЦВС обумовлюється наявністю між частинками цементу вільної води. Це припускає різкий перелом на кривій залежності в'язкості ЦВС від  $B/C$ . Проте вільна вода приводить до зниження морозостійкості, корозійної стійкості, тобто довговічності цементного каменю. Тому максимальне значення  $B/C$  для ЦВС, при якому ще не з'являється вільна вода, є оптимальним  $(B/C)_{opt}$  за її текучістю і довговічністю.

Для експериментальної перевірки цього були виготовлені склади ЦВС з  $B/C$  від 0,3 до 0,5. Для кожного складу вимірювали за допомогою віскозиметра ВЗ-1 умовну в'язкість  $t$  (с) і досліджували залежність  $t$  від  $B/C$ . На кривій чітко виділилися три ділянки, відповідних текучому, перехідному і структурованому стану. Ці три ділянки і перелам на кривій підтвердили правильність припущення про оптимізацію  $B/C$  і дозволили визначити її величину  $(B/C)_{opt} = 0,32$ .

На підставі розрахунків товщини шарів води на частинках цементу при  $B/C$ , відповідних вказаним ділянкам, і порівняння цієї товщини з розмірами частинок кристалогідратів розроблені схеми прошарків новоутворень між частинками цементу в ЦВС. За допомогою цих схем дано пояснення фізичної сутності в'язкості при різних  $B/C$ , оптимальної величини  $(B/C)_{opt}$  для ЦВС, а також розглянутий механізм дії добавок-суперпластифікаторів на її в'язкість. Згідно з цим механізмом добавки-суперпластифікатори, які є аніонними поліелектролітами, адсорбуються на позитивно заряджених ділянках  $C_3A$  і  $C_4AF$  поверхні частинок цементу, перезаряджають їх на негативно заряджені, так що електростатичне притягання між різнойменно зарядженими ділянками поверхонь частинок цементу змінюється на відштовхування, а флокули з частинок цементу пептизуються.

Ці уявлення дозволили розробити суперпластифіковану цементно-водну суспензію (СПЦВС) для цементациі гірських порід і будівельних конструкцій та спосіб експериментального визначення оптимальної витрати добавки-суперпластифікатора (одержано патент України №71208А).

З урахуванням викладеного розроблені нові принципи і способи визначення складів бетону для обводнених конструкцій. Недосконалість традиційних способів підштовхувала вчених на розроблення нових, досконаліших способів, які б забезпечували більш високу довговічність бетону в різних умовах експлуатації. Найзначніший внесок у розвиток таких способів розрахунку і створення більш довговічних бетонів внесли: Ю.М.Баженов, В.М.Вировий, Л.Й.Дворкін,

О.Л.Дворкін, І.А.Кирєєнко, А.М.Плугін із співр., В.М.Пунагін, Ш.М.Рахімбаєв, Н.М.Руденко, В.І.Соломатов та ін. Проте ці способи, як і традиційні, передбачають отримання заданої міцності бетону (за відомим законом  $B/C$ ) і необхідної зручноукладальності бетонної суміші (за осадкою конуса ОК або жорсткістю).

З появою добавок-суперпластифікаторів ОК стала вкрай недосконалим показником технологічності бетонної суміші, оскільки вона пов'язана з наявністю в ній вільної води, що знижує довговічність бетону. Отже, необхідно виключити вільну воду з бетонної суміші, а значить ОК, зберігаючи при цьому високу розтічність при вібрації. Така розтічність бетонної суміші з ОК  $\rightarrow 0$  (безосадкова суміш) названа нами вібророзтічністю. Вібророзтічність безосадкової суміші досягається при такому  $B/C$ , яке відповідає істинному водоцементному відношенню  $(B/C)_{icm} = 0,23$  і кількості води на змочування піску і щебеню в поєднанні з добавкою-суперпластифікатором.

Зниження осадки конуса бетонної суміші і зведення до мінімуму деформацій довготривалої повзучості розчину і бетону (бетон з низькою деформівністю) і їх безнапірної водопроникності забезпечується також дотриманням в них оптимальних величин  $\mu_{onm}$  і  $\alpha_{onm}$ . Викладені принципи підбору складів ЦВС, розчинів і бетонів для обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій покладені в основу нових способів розрахунку складу бетону з низькими деформівністю і безнапірною водопроникністю, у тому числі з мінеральним наповнювачем (одержано патенти №№ 62613 і 71122А). За одним з цих способів номінальний склад бетону визначають у такій послідовності: визначають оптимальні коефіцієнти  $\mu_{onm}$  і  $\alpha_{onm}$ ; визначають витрату щебеню, піску, цементу і води, відповідно, за виразами:

$$\begin{aligned} \text{Щ} &= \frac{1}{\frac{\text{Пус}^u}{\rho_n^u} \cdot \alpha_{onm} + \frac{1}{\rho^u}}; & \text{П} &= \frac{1 - \frac{\text{Щ}}{\rho^u}}{\frac{\text{Пус}^n}{\rho_n^n} \cdot \mu_{onm} + \frac{1}{\rho^n}}; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{Ц} &= \frac{1 - \frac{\text{Щ}}{\rho^u} - \frac{\text{П}}{\rho^n} - \frac{\text{Щ}W^u}{\rho^e} - \frac{\text{П}W^n}{\rho^e}}{\frac{1}{\rho^u} + \frac{0,23}{\rho^e}}; & \text{B} &= 0,23\text{Ц} + \text{Щ}W^u + \text{П}W^n; \end{aligned} \quad (24)$$

експериментально визначають оптимальну витрату добавки-суперпластифікатора.

Відповідно до цього способу виконано перевірочний розрахунок складу бетону з низькими деформівністю і водопроникністю з добавкою-суперпластифікатором Дофен, виготовлені і випробувані на міцність бетонні зразки. За розрахунком  $\alpha_{onm} = 1,1$ ,  $\mu_{onm} = 2,7$ ,  $B/C = 0,34$ , склад наведено в табл.4. Результати випробувань контрольного (традиційного) і наведеного (оптимального) складів містяться в табл.4. Як бачимо, бетон оптимального складу має вищу міцність і кращу вібророзтічність.

## Склади бетонів та їх характеристики

Склад	<i>Ц</i>	<i>Щ</i>	<i>П</i>	<i>В</i>	<i>В/Ц</i>	$R_{bnn}$ , МПа	Зручноукладальність
Традиційний	514	1149	630	188	0,36	40,7	$OK = 0,25$ см; $BP = 15$ с
Оптимальний	513	1343	397	176	0,34	43,4	$OK = 0,20$ см; $BP = 12$ с

Результати випробувань бетонних зразків-балок  $50 \times 100 \times 500$  мм на повзучість при згині і безнапірну водопроникність також показали, що бетон оптимального складу має набагато менші деформації повзучості (рис.13, *a*) і безнапірної водопроникності  $W_{\delta\delta}$  (рис.13, *b*), у порівнянні з бетоном традиційного складу, і що характери їх зміни в часі відповідають один одному.

**Сьомий розділ присвячений** експлуатаційним випробуванням і впровадженню результатів досліджень. У результаті розроблення нових уявлень і кількісних закономірностей про довговічність бетону і залізобетону в обводнених спорудах створений комплекс високоефективних методик дослідження їх технічного стану і прогнозування довговічності, розроблено загальні алгоритми прогнозування довговічності та її забезпечення на стадіях будівництва й експлуатації (рис.14). На основі цих алгоритмів можуть бути створені самостійні комп'ютерні розрахункові комплекси або складові таких комплексів розрахунку конструкцій, як Ліра, SCAD та ін. Був розроблений, успішно пройшов експлуатаційні випробування і впроваджений комплекс високоефективних матеріалів, виробів і технологій, призначений для захисту, відновлення, підсилення і продовження строку служби обводнених конструкцій і споруд шляхом припинення деформацій від повзучості та забезпечення їх водонепроникності і корозійної стійкості. Він включає: ін'єкційну СПЦВС для підсилення і герметизації конструкцій і споруд; розчини і бетони з низькими деформівністю і безнапірною водопроникністю; полімеркомпозиційні склади – просочувальний ПС-1, герметизуючий ГС-1, захисний ЗС-3 і т.п. (у тому числі стійкі в умовах біохімічної корозії); металополімерні локальні арматурні елементи і армокам'яні пояси з них, попередньо напружені залізобетонні міні-пояси (ненапружені і попередньо напружені), в тому числі у сполученні зі сталобетонними обоймами і т.п.

Конкретними практичними результатами дисертації є проекти і виконані роботи (за безпосередньою участю автора) з відновлення, підсилення, захисту і продовження строку служби обводнених бетонних, залізобетонних, кам'яних конструкцій і споруд: залізобетонної ванни плавального басейну «Локомотив» у м. Харкові; трьох бутобетонних опор з кам'яним облицюванням залізничного мосту через р. Сіверський Донець на ділянці Основа – Букине Південної залізниці (рис.15); прогонових споруд шляхопроводу у м. Одесі і мосту через р. Сироватка на ділянці Ворожба – Люботин Південної залізниці; залізничного тунелю на ділянці Самбір – Сянки Львівської залізниці.

Практичними результатами дисертації є також розроблені за участю автора нормативні та інструктивні документи, навчальні посібники, включення матеріалів дисертації у навчальні плани і робочі програми з дисциплін «Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів і конструкцій»,



«Відновлення експлуатаційних властивостей матеріалів і конструкцій», «Відновлення і захист промислових будівель і споруд на залізничному транспорті», «Будівельні матеріали» на будівельних факультетах УкрДАЗТ і ХДТУБА.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що значна частина обводнених бетонних, залізобетонних, кам'яних споруд (тунелів, водопропускних труб, мостів, колекторів, ємнісних споруд і т.п.) не витримує нормативних термінів служби, знаходиться в незадовільному стані, часто вимагає великих експлуатаційних витрат і невідкладного капітального ремонту. Основними факторами їх передчасних пошкоджень і зниження довговічності є обводнення і велика довжина конструкцій, що вигинаються і зазнають значних деформацій з утворенням тріщин, нестабільність цементного каменю, розчину і бетону за довготривалою повзучістю і безнапірною водопроникністю, недосконалість захисних і ремонтних матеріалів і технологій, а основною причиною – недосконалість теорії міцності і довговічності бетону і конструкцій з нього, що не дозволяє реалізувати їх великі потенційні можливості з довговічності.

2. Уточнені уявлення про бетон як полідисперсну систему з багаторівневою структурою, рівні якої – макро-, мезо-, мікро- та субмікро- визначаються розмірами структуроутворюючих елементів: за допомогою удосконалених електронно-мікроскопічних досліджень встановлено, що на субмікрорівні структурними елементами цементного каменю є частинки кристалогідратів і глобули гідросилікатного гелю, які є агрегатами частинок гелю.

3. Розроблена методика енергетичного (з урахуванням енергії Фермі) розрахунку електроповерхневих потенціалів простих речовин, за допомогою якої уточнені значення електроповерхневих потенціалів  $\psi^0$  і рівноважних електроповерхневих потенціалів  $\psi_p^0$  частинок кристалогідратів  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і гідросилікатів кальцію при різних рН. Удосконалені методики дослідження електроповерхневих властивостей – адсорбції колірних індикаторів і вимірювань у високовольтному електричному полі, за допомогою яких уточнені електроповерхневі потенціали кварцу і кальциту, які були використані при розрахунках довговічності в умовах біохімічної корозії.

4. Розроблена схема будови електрогетерогенних контактів між структурними елементами в цементному камені, розчині і бетоні, в якій виділені одиничні парні контакти між потенціалвизначальними іонами  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{OH}^-$ ; встановлена залежність корозійної стійкості цементного каменю і бетону від стабільності кристалогідратів  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , при розчиненні яких зменшується кількість ЕГК між ними і гідросилікатним гелем. На основі цього розроблені основи кількісної теорії міцності цементного каменю і бетону з відповідними рівняннями. Встановлене оптимальне співвідношення кристалогідратів і гелю  $(K/\Gamma)_{opt} = 0,9 \div 1,0$ , яке разом з оптимальними величинами  $(B/L)_{opt}$  і коефіцієнтів розсунення зерен дрібного і крупного заповнювача  $\mu_{opt}$  і  $\alpha_{opt}$  забезпечує максимальні міц-

ність, щільність, довговічність цементного каменю, розчину, бетону.

5. Розроблено уточнену фізико-математичну (реологічну) модель повзучості цементного каменю, в якій кінетика деформацій визначається коефіцієнтом фільтрації і довжиною шляху фільтрації води, що витискується, визначуваною розмірами зразка або конструкції (масштабний фактор). Виходячи з цього причина значних розбіжностей у тривалості повзучості бетону в стандартних зразках (2÷3 роки) і експлуатованих спорудах (десятки і сотні років) пояснена масштабним фактором.

6. Обґрунтований фільтраційний механізм довготривалої повзучості цементного каменю за рахунок безнапірної водопроникності, виведені рівняння для довготривалої повзучості на стадіях швидконатікаючої та довготривалої повзучості. Встановлено, що тривалість довготривалої повзучості цементного каменю визначається його безнапірною водопроникністю  $W_{\delta a}$  і довжиною шляху фільтрації, а гранична деформація – зменшенням товщини прошарків новоутворень між частинками цементу за рахунок стиснення ПЕШ частинок гелю. Показано, що мінімальна деформаційність і безнапірна водопроникність цементного каменю і бетону, тобто їх максимальна довговічність, забезпечуються при оптимальних величинах  $(K/\Gamma)_{opt}$ ,  $(B/\Omega)_{opt}$ , а у бетоні ще й  $\mu_{opt}$  і  $\alpha_{opt}$ .

7. Встановлено, що на довговічність однобічно обводнених або омиваних конструкцій з бетону найістотніший вплив мають вибуговування при фільтрації води через бетон або його омиванні, карбонізація (карбонатизація), біохімічна корозія. Механізми цих видів корозії пояснені фільтраційними потоками під дією безнапірної водопроникності бетону, капілярного і осмотичного тиску, дифузійними потоками іонів агресивних речовин і продуктів розчинення. Розроблені кінетичні рівняння для прогнозу довговічності обводнених конструкцій при вказаних видах корозії.

8. Розвинуті уявлення про механізм біохімічної корозії бетону в каналізаційних колекторах і подібних спорудах: оцінені електроповерхневі властивості клітин бактерій та їх взаємодія з цементним каменем; показано, що кінетика корозії бетону в результаті життєдіяльності тіонових бактерій визначається дифузією іонів  $H^+$ , електрофоретичним прониканням клітин углиб бетону і фільтраційним винесенням продуктів розчинення кристалогідратів під дією осмотичного тиску води; виведені відповідні кінетичні рівняння.

9. Експериментально підтверджені закономірності розробленої кількісної теорії міцності цементного каменю, уявлення про механізм його безнапірної водопроникності і визначальний вплив довжини шляху фільтрації і  $B/\Omega$  на кінетику і граничну деформацію довготривалої повзучості бетону. Отримані експериментальні значення  $W_{\delta a}$  цементного каменю на стадіях звичайної і довготривалої повзучості цементного каменю, близькі до розрахункових теоретичних, а розрахунково-експериментальні величини прогинів залізобетонних конструкцій порівнянні з реальними.

10. Обґрунтовано механізм в'язкості цементно-водних систем і впливу на в'язкість добавок-суперпластифікаторів як результат електростатичних взаємодій між різнойменно зарядженими ді-

лянками поверхонь частинок цементу. Розроблено експериментальний спосіб визначення оптимальних за текучістю і довговічністю  $(B/L)_{opt}$  і витрати добавки, на основі яких розроблена у співавторстві суперпластифікована цементно-водна суспензія для цементациї гірських порід і будівельних конструкцій, на яку отримано патент на винахід.

11. Розроблені нові принципи створення бетонів з низькими деформівністю і водопроникністю – з безосадкової  $(OK \rightarrow 0)$  бетонної суміші з високою вібророзтічністю за рахунок оптимальної витрати добавки-суперпластифікатора і забезпечення оптимальних значень  $\mu_{opt}$  і  $\alpha_{opt}$ , а на їх основі створений у співавторстві новий спосіб визначення складу бетону з низькими деформівністю і безнапірною водопроникністю, на який отримані патенти на винаходи. Експериментальні дослідження міцності, вібророзтічності, довготривалої повзучості і безнапірної водопроникності бетону, склад якого визначений новим способом, показали його високу ефективність.

12. За результатами досліджень створено комплекс високоефективних методик оцінки технічного стану, прогнозування і проектування довговічності обводнених конструкцій і споруд, нових матеріалів, виробів і технологій для їх відновлення, підсилення і продовження терміну служби.

13. Результати досліджень впроваджені при розробленні проектів і проведенні робіт (за безпосередньою участю автора) з відновлення, підсилення, подовження терміну служби обводнених споруд – залізничного тунелю на ділянці Самбір – Сянки Львівської залізниці, бутобетонних опор з кам'яним облицюванням залізничного мосту через р. Сіверський Донець на ділянці Основа – Букине Південної залізниці, залізобетонних прогонових споруд мосту через р. Сироватка на ділянці Ворожба – Люботин Південної залізниці і залізничного шляхопроводу в м. Одеса, залізобетонної ванни плавального басейну «Локомотив» в м. Харкові, конструкцій насосної станції №2А (Ново-Баварської) Харківської міської каналізації і т.п. Особистий внесок здобувача в економічний ефект, одержаний тільки Південною залізницею, склав 729423,25 грн. Результати досліджень широко використані у навчальному процесі на будівельних факультетах УкрДАЗТ і ХДТУБА а також розроблених з участю автора навчальних посібниках і нормативних документах.

#### **Основні положення дисертації опубліковані в таких роботах:**

1. Плу́гин А.А. Агрессивность эксплуатационной среды сетей и сооружений водоотведения. Электроповерхностные свойства тионовых бактерий // Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2005.- Вип.30.- Т.2.- С.75-79.
2. Плу́гин А.А. Агресивні дії на залізобетонну обробку тунелів метрополітену// Зб.наук. праць.- Харків: ХарДАЗТ, 2004.- Вип.63.- С.48-62.
3. Плу́гин А.А. Долговечность бетона транспортных сооружений, эксплуатируемых в условиях обводнения // Вісник НУВГП.- Рівне, 2004.- Ч.2.- Вип.4(28).- С.175-179.
4. Плу́гин А.А. Об определении электроповерхностного потенциала в твердеющих минеральных

вяжущих // Вестник НТУ ХПИ.- 2004.- Вып.33.- С.66-74.

5. Плу́гин А.А. Об электроповерхностном потенциале в твердеющих минеральных вяжущих // Вестник НТУ ХПИ.- 2003.- Вып.15.- С.66-74.

6. Плу́гин А.А. Стойкость к биогенной сернокислой коррозии материалов на модифицированных кислотоупорных вяжущих // Науковий вісник будівництва.- 1998.- Вип.3.- С.141-142.

7. Плу́гин А.А., Бабушкин В.И., Юрченко В.А. Формирование агрессивности эксплуатационной среды сетей и сооружений водоотведения. Состав сред и основные реакции // Науковий вісник будівництва.- 2002.- Вип.16.- С.121÷125. (Здобувач виконав термодинамічні розрахунки хімічних та біохімічних реакцій, що призводять до утворення агресивності середовища, встановив найбільш вірогідні реакції та умови їх протікання).

8. Исследование деформационных характеристик тонкостенной железобетонной конструкции / А.А.Плу́гин, А.Н.Плу́гин, С.Н.Кудренко, Д.А.Плу́гин, О.А.Калинин // Залізничний транспорт України.- 2001- №3(24).- С.25-27. (Здобувач проаналізував і оцінив кінетику деформування стін залізобетонної ванни).

9. Понаднормативна довгочасна повзучість бетону в залізобетонній конструкції місткісної споруди / А.А.Плу́гин, А.М.Плу́гин, С.М.Кудренко, Д.А.Плу́гин // Зб. наук.праць.- Харків: ХарДАЗТ, 2000.- Вип.37.- С.32-44. (Здобувач розробив методику досліджень, визначив розрахункові схеми, побудував епюри напруг, визначив склад старого бетону, розрахував за даними про склад деформації довготривалої повзучості конструкції за 25 років).

10. Плу́гин А.А., Костюк Т.А., Бабушкін В.І. Управління міцністю дрібнозернистого бетону одразу після формування на основі урахування електроповерхневих властивостей його складових // Науковий вісник будівництва.- 1999.- Вип.7.- С.63-67. (Здобувач запропонував трактування Льюїсівських та Бренстедівських активних поверхневих центрів як відповідальних за знак і величину поверхневого заряду і розробив методику розрахунку).

11. Физико-математические модели долговременной ползучести и безнапорной водопроницаемости цементного камня и бетона / А.Н.Плу́гин, А.А.Плу́гин, О.А. Калинин, С.В.Мирошниченко, С.Н.Кудренко, А.В.Никитинский, В.А.Лютый // Зб.наук.праць.- Луганськ: ЛНАУ, 2004.- №40(52). - С.145-154. (Здобувач розробив гіпотезу про фільтраційний механізм довготривалої повзучості за рахунок безнапірної водопроникності, вивів рівняння для стадії довготривалої повзучості).

12. Электрокоррозия железобетонных мостов и других искусственных сооружений / А.Н. Плу́гин, А.А.Скорик, А.А.Плу́гин, С.В.Мирошниченко, О.А. Калинин, И.В.Подтележникова, О.С.Герасименко, В.А.Лютый // Залізничний транспорт України.- 2004.- №1.- С.11-13. (Здобувач розробив схеми витоку струмів через конструкції мосту).

13. Электрокоррозия бетону железобетонных блоков обработки метрополитену / А.М. Плу́гин, А.А.Плу́гин, О.О.Скорик, О.С.Герасименко, Л.В.Трикоз, М.Ф.Макеев // Зб. наук. праць.- Харків:

УкрДАЗТ, 2003.- Вип.56.- С.126-135. (Здобувач розробив схеми витоку струмів через обробку тунелю).

14. Структура и долговременные свойства бетона / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко // Строительные материалы и изделия.- 2003.- №4(18).- С.17-22. (Здобувач виконав фотографування і класифікацію багаторівневої структури бетону).

15. Автоматизированное регулирование состава раствора для цементации межтрубного зазора при ремонте коллекторов водоотведения методом вставок / А.В.Донец, А.А.Плугин, И.В.Коринько, Д.Ф.Гончаренко // Науковий вісник будівництва.-2002.- Вип.20.- С.125-129. (Здобувач обґрунтував склад і властивості ін'єкційного розчину, які забезпечать його проникну здатність і довговічність конструкції).

16. Теория удобоукладываемости бетонных смесей. Уплотняемость / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А.Плугин, С.Н.Кудренко // Науковий вісник будівництва.- 2002.- Вип.19.- С.233-238. (Здобувач сформулював принципи безосадкової вібророзтічності бетонної суміші, розробив спосіб оцінки вібророзтічності, виконав розрахунки).

17. Теория удобоукладываемости бетонных смесей. Жесткость / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А.Плугин, С.Н.Кудренко // Науковий вісник будівництва.- 2002.- Вип.18.- С.122-129. (Здобувач вивів рівняння залежності жорсткості суміші від її структурних характеристик).

18. Теория удобоукладываемости бетонных смесей. Пластичность / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А.Плугин, С.Н.Кудренко // Науковий вісник будівництва.- 2002.- Вип.17.- С.132-142. (Здобувач вивів рівняння осідання бетонної суміші в залежності від коефіцієнтів розсунення зерен заповнювачів).

19. Содержание и ремонт инженерных сооружений, работающих в сложных условиях / А.Н.Плугин, О.А.Калинин, Д.В.Шумик, А.В.Никитинский, В.К.Бабенко, А.Е.Тарасенко, А.А.Плугин // Залізничний транспорт України.- 2001- №2(23).- С.49-53. (Здобувач розробив комплекс методик досліджень технічного стану обводнених інженерних споруд).

20. Новая технология ремонту кам'яних опор з силовими тріщинами / А.М.Плугін, С.В.Мірошніченко, О.А.Калінін, А.А.Плугін, В.К.Бабенко, А.В.Никитинський, В.А.Лютій // Зб.наук. праць.- Харків: ХарДАЗТ, 2001.- Вип.48.- С.4-10. (Здобувач розробив методику досліджень стану опор, запропонував для забиття швів застосувати малоусадковий розчин і розробив його склад).

21. Донец А.В., Плугин А.А., Титов Д.М. Анализ применимости методов производственного контроля технологичности строительных смесей для АСУ ТП // Науковий вісник будівництва.- 2001.- Вип.14.- С.265-272. (Здобувач запропонував вирази для взаємозв'язку між реологічними технологічними і реологічними фундаментальними властивостями будівельних сумішей).

22. Теоретические основы создания клееных деревянных мостовых брусьев и совершенствования технологии их изготовления. Структура и электроповерхностные свойства древесины / А.Н.Плугин, Д.А.Плугин, Л.В.Трикоз, А.А.Плугин, С.В.Мирошниченко, О.А.Калинин // Науковий вісник будівництва.- 2001.- Вип.13.- С.219-229. (Здобувач виконав розрахунки електроповерхневих властивостей кварцу і складових деревини).
23. Количественное описание реологических характеристик цементно-водных суспензий и механизма действия на них суперпластификаторов / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, Д.В.Шумик, Арт.Н.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошніченко // Науковий вісник будівництва.- 2001.- Вип.12.- С.173-189. (Здобувач розробив схему контакту між частинками цементу, виконав розрахунки електроповерхневих потенціалів і розклинювального тиску).
24. Механизм влияния добавок-суперпластификаторов на прочность цементного камня из СПЦВС / А.Н.Плугин, Д.В.Шумик, А.А.Плугин, О.А.Калинин, А.В.Никитинский // Науковий вісник будівництва.- 2000.- Вип.10.- 138-146. (Здобувач розробив схеми електрогетерогенних контактів і взаємодії добавки з поверхнею частинок цементу, виконав розрахунки електроповерхневих потенціалів).
25. Развитие теории деформативности бетона на основе преобразованной модели Кельвина / А.Н.Плугин, С.Н.Кудренко, А.А.Плугин, С.В.Мирошниченко, О.А.Калинин // Науковий вісник будівництва.- 2000.- Вип.9.- 183-189. (Здобувач виконав аналіз рівняння Кельвіна, довів залежність тривалості деформації повзучості зразка або конструкції з їх розмірами).
26. Влияние электроповерхневых потенциалов минералов портландцемента на його взаємодію з суперпластифікаторами / А.М.Плугін, Д.В.Шумик, Арт.М.Плугін, А.А.Плугін // Зб. наук. праць.- ХарДАЗТ, 2000.- Вип.44.- С.74-79. (Здобувач виконав розрахунок електроповерхневих потенціалів продуктів гідратації портландцементу з добавками).
27. Сутність граничної деформації повзучості бетону / А.М.Плугін, С.В.Мірошніченко, О.А.Калінін, А.А.Плугін, С.М.Кудренко, В.В.Новіков // Зб. наук. праць.- ХарДАЗТ, 2000.- Вип.42.- Ч.1.- С.89-96. (Здобувач висунув гіпотезу про фільтраційний механізм повзучості згідно з законом Дарсі).
28. Кинетические аспекты количественной теории деформирования бетона / А.Н.Плугин, О.А.Калинин, С.Н.Кудренко, С.В.Мирошниченко, А.А.Плугин // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво.- 2000.- №59.- С.178-182. (Здобувач проаналізував можливість застосування до повзучості моделі Терцагі).
29. Влияние активных поверхностных центров на прочность свежееотформованных мелкозернистых бетонов / В.И.Бабушкин, А.А.Плугин, Т.А.Костюк, В.А. Матвиенко // Науковий вісник будівництва.- 1999.- Вип.5.- С.85-88. (Здобувач запропонував гіпотезу про досягнення максимальної міцності бетонів і розчинів при рівній вимірюваній концентрації в суміші позитивно і негативно заряджених поверхневих активних центрів, запланував експеримент і проаналізував його резуль-

тати).

30. Бабушкин В.И., Плугин А.А., Костюк Т.А. Особенности подбора состава формовочной смеси для цементно-песчаных стеновых материалов заданной плотности // Науковий вісник будівництва.- 1998.- Вип.4.- С.61-63. (Здобувач одержав вирази для розрахунку складів заданої міцності з врахуванням коефіцієнту розсунення дрібного заповнювача).

31. Коррозионностойкие материалы на основе минеральных вяжущих для систем городской канализации / В.И.Бабушкин, А.А.Плугин, Д.Ю.Зеленский, С.З. Жалкина, Г.Ш.Салия // Науковий вісник будівництва.- 1998.- Вип.2.- С.195-199. (Здобувач висунув гіпотези про підвищення водостійкості кислототривких в'язучих за рахунок утворення цеолітоподібних алюмосилікатів натрію і кальцію та їх бактерицидну дію, провів термодинамічні розрахунки, планування експериментів і аналіз їх результатів).

32. Плугин А.Н., Плугин А.А., Калинин О.А. Коллоидно-химические основы прочности, разрушения и долговечности бетона и железобетонных конструкций// Цемент.- 1997.- №2.- С.28-32. (Здобувач розробив удосконалені схеми електрогетерогенних контактів).

33. Биоповреждения конструкций систем городской канализации / В.И.Бабушкин, А.А.Плугин, Д.Ю.Зеленский, Г.Я.Дрозд // Коммунальное хозяйство городов.- 1997.- Вып.10.- С.95-98. (Здобувач систематизував дані про біопшкодження, виконав термодинамічні розрахунки біохімічних реакцій сульфатредукції та окислення сірководню, уточнив умови їх протікання).

34. Комплект бетонных виробів ефективної автономної системи каналізації для сільської місцевості / В.И.Бабушкин, С.З.Жалкина, Д.Ю.Зеленский, А.А.Плугин// Науковий вісник будівництва.- 1997.- Вип.1.- С. 23-26. (Здобувач запропонував склади в'язучих речовин і бетонів для корозійно-стійких труб).

35. Плугин А.Н., Плугин А.А. Природа коагуляционных контактов и их роль в обеспечении прочности и водостойкости вяжущих и композиционных материалов // Межвуз. сб. науч. тр.- Харьков: ХарГАЖТ, 1996.- Вып.26.- Т.1.- С.39-47. (Здобувач виконав опис механізму стійкості контактів на основі фізико-хімічної теорії міцності дисперсних систем Ребіндера-Щукіна).

### АНОТАЦІЯ

Плугін Андрій Аркадійович. Довговічність бетону і залізобетону в обводнених спорудах: Коллоїдно-хімічні основи. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали і виробли. Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури, Харків, 2005.

Довговічність бетону і залізобетону у великогабаритних спорудах, зокрема тунелях, мостах, каналізаційних колекторах, резервуарах та ін., експлуатованих в умовах обводнення та вигину, на-

багато нижча, ніж у експлуатованих в нормальних умовах. Існуючі уявлення про довговічність і сам бетон для таких конструкцій недосконалі.

У дисертації розвинена кількісна теорія довговічності бетону і залізобетону в обводнених спорудах. Особливість цієї кількісної теорії полягає в тому, що вона ґрунтується на закономірностях колоїдної хімії, фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів і основних положеннях про електрогетерогенні взаємодії при твердінні цементного каменю. На основі цих закономірностей і положень даються нові уявлення про механізми елементарних процесів формування міцності, руйнування, деформівності, водопроникності, корозійної стійкості, тріщиностійкості і в цілому довговічності цементного каменю, розчину, бетону й обводнених конструкцій з них. Виведені відповідні фізико-математичні моделі, що дозволяють прогнозувати довговічність вказаних обводнених конструкцій і споруд.

Розроблені нові теоретичні уявлення про довговічність бетону і залізобетону в обводнених спорудах дозволили створити комплекс вискоефективних методик дослідження їх технічного стану, нових матеріалів, виробів і технологій для їх відновлення, підсилення, герметизації і продовження термінів служби, який ефективно використаний на багатьох реальних конструкціях і спорудах.

**Ключові слова:** довговічність, бетон, залізобетон, тунелі, мости, обводнення, фільтрація, повзучість, корозія, біохімічна корозія, водопроникність, експлуатація, захист, суперпластифікатор.

## АННОТАЦИЯ

Плутин Андрей Аркадьевич. Долговечность бетона и железобетона в обводненных сооружениях: Коллоидно-химические основы. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры, Харьков, 2005.

Долговечность бетона и железобетона в крупногабаритных сооружениях, в частности тоннелях, мостах, канализационных коллекторах, резервуарах и др., эксплуатируемых в условиях обводнения и изгиба, намного ниже, чем у эксплуатируемых в нормальных условиях. Существующие представления о долговечности и сам бетон для таких конструкций несовершенны.

В диссертации развита количественная теория долговечности бетона и железобетона в обводненных сооружениях. Особенность этой количественной теории заключается в том, что она основывается на закономерностях коллоидной химии, физико-химической механики дисперсных систем и материалов и основных положениях об электрогетерогенных взаимодействиях при твердении цементных вяжущих. На основе этих закономерностей и положений даются новые представления о механизмах элементарных процессов формирования прочности, разрушения, деформативности, водопроницаемости, коррозионной стойкости, трещиностойкости и в целом долговечности



цементного камня, раствора и бетона и обводненных конструкций из них. В качестве основных факторов, ускоряющих разрушение указанных конструкций и сооружений, рассматривается их обводнение, долговременная ползучесть и безнапорная водопроницаемость бетона в конструкциях. Развита представления о микроструктуре и субмикроструктуре цементного камня, о его прочности, разрушении от механических нагрузок и агрессивных воздействий, раскрываются механизмы долговременной ползучести и безнапорной водопроницаемости. Значительно расширены представления о коррозии выщелачивания и биохимической коррозии, даны уравнения для прогнозирования срока службы конструкций в условиях этих видов коррозии. Соответствующие модели и уравнения основаны на установлении стационарных потоков под действием осмотического и капиллярного давлений, диффузии, фильтрации.

Разработанные новые теоретические представления о долговечности бетона и железобетона в обводненных сооружениях позволили создать комплекс высокоэффективных методик исследования их технического состояния, новых материалов, изделий и технологий для их восстановления, усиления, герметизации и продления сроков службы, который эффективно использован на многих реальных конструкциях и сооружениях.

Ключевые слова: долговечность, бетон, железобетон, тоннели, мосты, обводненность, фильтрация, ползучесть, коррозия, биохимическая коррозия, водопроницаемость, эксплуатация, защита, суперпластификатор.

### ABSTRACT

Plugin Andrei A. The durability of a concrete and reinforced concrete of a water-contently structures: the colloid-chemistry basis. The manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of a doctor of science (engineering) on a speciality 05.23.05 – building materials and products. The Kharkov State Technical University of Construction and Architecture, Kharkov, 2005.

The durability of a concrete and reinforced concrete of the large structures, in particular tunnels, bridges, sewage collectors, reservoirs et al, exploited in the conditions of flooding and bend, far below, than exploited in normal circumstances. The existent notions of durability and concrete for such constructions are unaccomplished.

In dissertation the quantitative theory of durability of flooding concrete, reinforced concrete and stone constructions and building are developed. The feature of this quantitative theory consists that in it are used ideas of colloid chemistry, physic-mechanics of the dispersion systems and materials and basic positions about electroheterogeneous interaction at hardening cement bindings.

On the basis of these ideas and positions new notions of machineries of elementary processes of forming of strength, destruction, deformable, waterpermeability, corrosive resistance, crack resistance and

on the whole durability of cement stone, mortar and concrete and flooding constructions from them are given.

The proper physic-mathematical models allowing to forecast durability of the indicated flooding constructions are developed.

The developed new theoretical notions of durability of flooding constructions allowed to create the complex of high effective a methods of research of their technical state, and also complex of new materials, products and technologies for their renewal, strengthening, sealing and extension of durability, which is effectively used on many real constructions and building.

Keywords: Durability, concrete, reinforced concrete, tunnels, bridges, flooding, filtration, creep, corrosion, biochemistry corrosion, waterpermeability, exploitation, defense, superplasticizer.

Підписано до друку 25.07.2005  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір писальний.  
Гарнітура Times. Умовн.-друк.арк.2,3.  
Тираж 100 прим. Зам.№

Видавництво УкрДАЗТ, Свідоцтво ДК №112 від 06.07.2000  
Друкарня УкрДАЗТ, пл. Фейербаха 7, Харків 61050