

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

САВИЦЬКИЙ Микола Васильович

УДК 691.328.1:624.46.5:620.193.4

**ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
КОНСТРУКЦІЙ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Спеціальності: 05.23.01 - Будівельні конструкції,  
будівлі та споруди  
05.23.05 - Будівельні матеріали  
та вироби.

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпропетровськ - 1994

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському інженерно-будівельному інституті та Науково-дослідному, проектно-конструкторському і технологічному інституті бетону і залізобетону.

Науковий консультант

Доктор технічних наук, професор

Є.А.Гузєєв

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук, професор

Л.М.Томіца

2. Доктор технічних наук, професор

В.Л.Чернявський

3. Доктор технічних наук, професор

Є.А.Яценко

Провідна організація -

Науково-дослідний інститут  
будівельних конструкцій  
МГібудархітектури, м. Київ

Залист відбудеться 3 березня 1994 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.32.01 по захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук в Дніпропетровському інженерно-будівельному інституті за адресою: 320600, Дніпропетровськ, вул. Чернишевського, 24-А.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту.  
Автореферат розісланий 27 січня 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради Д 068.32.01

канд. техн. наук. доц.

*А.М. Лук'янівська*

А.М. Лук'янівська

м. В. Стефаніка  
Н України

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00756643 (V)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Значний обсяг залізобетонних конструкцій в промисловості та сільськогосподарському виробництві зазнає дії агресивних середовищ. Досвід обстеження залізобетонних конструкцій, а також дані про матеріальні втрати від корозії засвідчують про актуальність проблеми забезпечення їх довговічності. Одним із шляхів підвищення надійності і ефективності застосування конструкцій в агресивних середовищах є вдосконалення і розвиток наукових основ конструктивно-технологічного проектування залізобетонних конструкцій.

В нормах проектування конструкцій, як колишнього СРСР, так і ЄС, США та ін. не міститься будь-яких положень по проектуванню залізобетонних конструкцій з урахуванням кінетики корозійних процесів. Однак є ряд конструкцій, для яких неможливо виконати вторинний захист (ізоляцію) конструкцій. На стадії експлуатації та при реконструкції об'єктів часто виникає необхідність діагностики стану конструкцій, оцінки їх ресурсу з урахуванням накопичення корозійних пошкоджень в матеріалах конструкцій.

Проблема забезпечення довговічності матеріалів та конструкцій розглядається сьогодні з техніко-економічних позицій. Підвищення ефективності застосування бетону та залізобетону досягається як шляхом розширення обсягу використання бетону і арматури підвищеної корозійної стійкості, так і виявленням надмірних резервів корозійної стійкості конструкцій. Проведені в останні роки дослідження виявили можливість підвищення ефективності проектних рішень антикорозійного захисту конструкцій шляхом оцінки корозійної небезпеки середовища не

тільки відносно бетону чи арматури (як це виконується сьогодні), але й, безпосередньо, до залізобетонних конструкцій, виходячи з функціональних вимог до даних конструкцій. Сьогодні, згідно експертним оцінкам, на частку конструктивних рішень доводиться всього 1% від усіх способів захисту і підвищення довговічності залізобетонних елементів, тобто конструктивні рішення практично не використовуються.

Таким чином, проектування антикорозійного захисту, являючись цілком комплексом технологічних задач, тісно стикається з задачами конструктивного характеру. Лише виходячи із функціональних вимог до даної конструкції можливо вирішувати задачі забезпечення її надійності як цілому, так і окремих її елементів (бетону та арматури). Відсутність у вітчизняній та світовій практиці при проектуванні складу бетону і конструкцій із бетону та залізобетону прогнозних розрахунків довговічності часто приводить до появи недостатньо обгрунтованих рішень. Сукупність викладеного вище визначає актуальність роботи і дозволяє класифікувати розрахунок надійності залізобетонних конструкцій в агресивних середовищах, як велику наукову проблему, що має важливе народногосподарське значення.

Метою дисертаційної роботи є розробка основ розрахунку надійності несучих залізобетонних конструкцій в умовах дії агресивних середовищ.

Робочою гіпотезою було уявлення про значимий вплив конструктивних параметрів первинного захисту (форм і розмірів перерізів, міцнісних та деформативних характеристик бетону та арматури, ступеня армування, схеми прикладання середовища) на зміну функціональних властивостей (міцності, деформативності, тріщиностійкості) залізобетонних елементів при накопиченні ко-

розійних пошкоджень в структурі бетону. Як висновок робочої гіпотези є положення про необхідність оцінки корозійної небезпеки середовища по відношенню не тільки до матеріалів, а також, безпосередньо, до залізобетонних конструкцій за критерієм зміни їх функціональних властивостей.

Відповідно з поставленою метою і станом питання основними завданнями досліджень були:

1. Розробка загального системного підходу, положень та принципів вирішення задач, зв'язаних з оцінкою надійності залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в агресивних середовищах.

2. Розробка загальної фізичної і математичної моделі та алгоритму її розв'язку для опису процесу корозії бетону при дифузії, що ускладнена хімічними реакціями.

3. Апробація загальної математичної моделі процесу корозії для опису кінетики сульфатної корозії бетону.

4. Експериментальні дослідження залежності ефективного коефіцієнту дифузії та константи швидкості хімічної реакції для сульфат-іонів від визначальних факторів.

5. Розробка інженерної методики для опису зміни корозійних полів в просторі та часі.

6. Експериментальні дослідження та формалізоване подання зміни міцнісних та деформативних характеристик бетону при дії типових агресивних середовищ.

7. Експериментально-теоретичні дослідження залізобетонних елементів для вдосконалення методів оцінки їх напружено-деформованого стану.

8. Дослідження мінливості параметрів залізобетонних конструкцій, які визначають їх надійність.

9. Розробка чисельно-аналітичного методу оцінки надійності та довговічності залізобетонних конструкцій, які працюють в агресивних середовищах.

10. Дослідження рівня надійності залізобетонних конструкцій для встановлення нормованого значення.

11. Агробація методики оцінки надійності для вирішення деяких практичних задач.

12. Розробка пропозицій для норм проектування залізобетонних конструкцій з урахуванням дії агресивних середовищ.

Автор захищає:

- загальну методику, положення і принципи вирішення задач оцінки надійності залізобетонних конструкцій, які працюють в умовах дії агресивних середовищ;

- фізичну і математичну моделі процесу корозії бетону при дифузії, яка ускладнена хімічними реакціями;

- інженерну методику для опису зміни корозійних полів в просторі і часі;

- результати експериментальних досліджень залежності параметрів кінетики сульфатної корозії бетону від вихідних факторів;

- аналітичне подання і результати експериментальних досліджень міцнісних та деформативних характеристик бетону при дії типових агресивних середовищ;

- методи розрахунку напружено-деформованого стану стержневих залізобетонних елементів при накопиченні корозійних пошкоджень в структурі бетону;

- експериментальні методики і результати експериментальних досліджень, які дозволили одержати діаграми рівноважного стану залізобетонних згинальних елементів і з'ясувати особли-

вості впливу агресивних сульфатних розчинів на зміну характеристик напружено-деформованого стану;

- розрахункові критерії міцності перерізів, нормальних до подовжньої осі (поза зв'язком з граничною висотою стиснутої зони бетону);

- результати чисельного моделювання впливу конструктивно-технологічних параметрів на зміни характеристик напружено-деформованого стану залізобетонних елементів при дії агресивних середовищ;

- результати дослідження мінливості конструктивно-технологічних параметрів, які визначають надійність залізобетонних конструкцій;

- чисельно-аналітичний метод побудови розподілень складних функцій, які описують функціональні властивості залізобетонних конструкцій;

- результати дослідження рівня надійності залізобетонних конструкцій, що проектується для звичайних умов експлуатації;

- результати ранжування конструктивних параметрів, які забезпечують надійність згинальних залізобетонних елементів;

- методику розрахунку надійності бетону захистого шару, який забезпечує збереження арматури при дії агресивних середовищ;

- результати досліджень оцінки надійності залізобетонних згинальних елементів за міцністю нормальних перерізів і ранжування конструктивно-технологічних параметрів первинного захисту при дії сульфатних розчинів;

- результати варіантного проектування антикорозійного захисту деяких залізобетонних конструкцій з урахуванням кінетики корозії бетону;

- пропозиції для норм проектування, які забезпечують надійність і довговічність залізобетонних конструкцій з урахуванням дії агресивних середовищ.

Наукову новизну роботи складають:

- системний підхід до оцінки і забезпечення надійності несучих залізобетонних конструкцій, які працюють в умовах дії агресивних середовищ, заснований на фізико-хімічних закономірностях процесів накопичення корозійних пошкоджень в структурі бетону і їх впливу на напружено-деформований стан;

узагальнена фізична та математична моделі процесу корозії при дифузії, що ускладнена хімічними реакціями, яка дозволяє врахувати найважливіші особливості процесу і властивості реального бетону, а також використовує інтегральні термодинамічні та кінетичні параметри процесу корозії;

- інженерна методика для опису розподілення корозійних полів при одномірному та багатомірному процесах масопереносу;

- кількісні залежності термодинамічних та кінетичних параметрів процесу сульфатної корозії бетону (ефективного коефіцієнту дифузії та константи швидкості хімічних реакцій) від визначальних факторів;

- аналітичне подання і результати експериментальних досліджень зміни міцнісних та деформативних характеристик бетону при дії агресивних розчинів;

- методи розрахунку напружено-деформованого стану стержневих залізобетонних елементів, які засновані на використанні рівнянь механічного стану і модельних уявленнях залізобетонних елементів;

- фізичний критерій міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів (максимум функції рірчоважного стану) у

випадку руйнування цю бетону стиснутої зони, що дозволяє визначати їх міцність у випадку комплексних перерізів (з неоднорідними характеристиками бетону), пога зв'язком з граничною висотою стиснутої зони;

- експериментальні методики та результати експериментальних досліджень згинальних залізобетонних елементів в умовах дії агресивного середовища, які дозволили вперше одержати діаграми рівноважного стану, включаючи і "закритичну" стадію роботи, а також в'ясувати особливості впливу сульфатних розчинів на зміни характеристик напружено-деформованого стану;

- установлені закономірності та виявлений механізм впливу конструктивних параметрів на зміну міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії корозійно-активних середовищ;

- установлені узагальнені залежності фактичної міцності захисних шарів та геометричних параметрів залізобетонних конструкцій;

- чисельно-аналітичний метод побудови розподілень складних функцій, які описують властивості залізобетонних конструкцій, що дозволяє використовувати аналітичний метод побудови розподілень функцій, які не визначаються в явному вигляді, зменшити загальну похибку, обумовлену нелінійністю функції, врахувати можливість перебування функції на різних ділянках визначення аргументів;

- результати оцінки рівня надійності конструкцій при врахуванні нормованої (проектної) та фактичної міцності визначальних параметрів на основі детермінованих залежностей норм проектування, а також методу оцінки НДС, в якому використовуються діаграми бетону та арматури з урахуванням їх міцності;

- результати ранжування конструктивних параметрів за критерієм їх впливу на забезпечення надійності міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів в залежності від їх конструктивних особливостей;

- методика розрахунку надійності бетону захисного шару за критерієм недопущення корозії арматури, порушення її зчеплення з бетоном, руйнування захисного шару, яка дозволяє виконувати оцінку та прогноз надійності та довговічності захисного шару, визначити технологічні параметри бетону, які забезпечують задану довговічність;

- результати розрахунку міцності напівімовірним та імовірним методами, кількісні показники надійності та довговічності; результати ранжування конструктивно-технологічних параметрів за критерієм їх впливу на забезпечення надійності міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії агресивних сульфатних розчинів;

- результати варіантного проектування антикорозійного захисту залізобетонних конструкцій із урахуванням кінетики процесів корозії бетону;

- пропозиції для норм проектування, що забезпечують надійність та довговічність залізобетонних конструкцій, які працюють в умовах дії агресивних середовищ.

#### Практичне значення і впровадження результатів

Вирішена важлива науково-практична проблема підвищення ефективності застосування несучих залізобетонних конструкцій в умовах дії агресивних середовищ шляхом розробки основ прогнозування та регулювання надійності конструкцій за рахунок раціонального вибору конструктивно-технологічних параметрів первинного захисту.

Результати роботи впроваджені в нормативні документи:  
"Рекомендації по оцінці стану залізобетонних конструкцій при експлуатації в агресивних середовищах" // М.: НИИЖБ, 1984. - 35 с.

"Рекомендації по визначенню терміну служби залізобетонних конструкцій підприємств чорної металургії і важкого машинобудування, які реконструюються" // Харків: Харківський ПромбудНДІпроект-НДІЗБ, 1984. - 41 с.

"Рекомендації по забезпеченню надійності та довговічності залізобетонних конструкцій промислових будівель і споруд при їх реконструкції та відновленні" // М.: Стройиздат, 1990. - 176 с.

Результати досліджень надані НДІЗБ і використані при виконанні теми "Пропозиції по розробці норм проектування бетонних та залізобетонних конструкцій на основі імовірного розрахунку", що розвиває комплекс нормативно-технічних документів "Залізобетонні конструкції".

Результати досліджень знайшли відображення в навчальному посібнику для студентів будівельних спеціальностей "Довговічність бетонних та залізобетонних виробів і конструкцій" (співавтори В.М.Пунагін, А.П.Приходько). - Київ: УМК ГС, 1988. - 112 с.

Результати досліджень використані при обстеженні та діагностиці технічного стану і розробці проектів відновлення залізобетонних конструкцій ряду об'єктів Зміївської та Криворізької ДРЕС, КВО "Кіровоградсьлібудіндустрія", бази будіндустрії "Укрметалургбудпостач", Запорізької АЕС та ін.

Результати досліджень використані також при розробці "Рекомендацій по застосуванню бетону на цементах Вільшанського заводу в умовах сульфатної агресії" для об'єднання "Мико-

ла [воблагрбуд", "Рекомендацій по застосуванню бетонних та залізобетонних конструкцій, виготовлених з використанням цементів Амвросіївського та Єнакіївського заводів, в умовах сульфатної агресії" для ВО "Азовзалізобетон" і тресту "Донецькметалургбуд", "Рекомендацій по застосуванню бетонних і залізобетонних конструкцій, виготовлених із бетону на карбонатних заповнювачах, в умовах сульфатної агресії" для БЕМО "Кримспецбуд", "Методичних рекомендацій по визначенню економічних втрат від корозії основних фондів комунального господарства в результаті забрудненню навколишнього природного середовища" для Мінприроди України.

Апробація роботи та публікації. Матеріали дисертації доповідались і обговорювались на XXIII і XXIV Міжнародних конференціях по бетону і залізобетону (Москва-Ленінград, 1991; Домбай, 1992); II Міжнародній конференції "Матеріали для будівництва" (Дніпропетровськ, 1993); Об'єднаній сесії національних комітетів ФІП і ЄКВ (Новополюцьк, 1991); науковій конференції, присвяченій пам'яті О.О.Гвоздева (Москва, 1993); Всесоюзній координаційній нараді (Ташкент, 1990); Всесоюзних конференціях (Владивосток, 1980; Ростов-на-Дону, 1981; Челябінськ, 1984; Севастополь, 1988); республіканських конференціях (Уфа, 1985; Полтава, 1989); науково-технічних конференціях: XII (Хабаровськ, 1981, 1987), МІІТ (Москва, 1990), ДІБІ (Дніпропетровськ, 1993), ЧІТІ (Черкаси, 1993), Всесоюзному семінарі (Макіївка, 1986), науково-технічних семінарах (Уфа, 1987; Волгоград, 1987, 1990; Пенза, 1991; Красноярськ, 1989), Всеросійській науково-технічній нараді "ПРЕДСО-93" (Санкт-Петербург, 1993), науково-технічній раді НДІЗБ (1990...1993).

За темою дисертації опубліковано більш, ніж 50 робіт, включаючи 3 нормативних документи, навчальний посібник, статті в наукових журналах, збірниках, працях конференцій та нарад.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 8 розділів, основних висновків, списку літератури із 378 найменувань, додатку, містить 400 стор., в т.ч. 332 - машинописного тексту, 77 рисунків, 14 табл.

Робота виконана на кафедрі залізобетонних та кам'яних конструкцій Дніпропетровського інженерно-будівельного інституту і в лабораторії короаї Науково-дослідного, проектно-конструкторського і технологічного інституту бетону та залізобетону в 1981...1993 роках.

#### ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ. Однією із причин передчасної деградації конструкцій є помилки проектування, що обумовлено, подекуди, недосконалістю норм проектування конструкцій з урахуванням агресивних дій середовища. Виконаний аналіз сучасних норм проектування залізобетонних конструкцій на основі напівіміційного методу граничних станів показав, що у випадку пошкодження, або зміни властивостей бетону згідно простих схем, можливо зберегти чинну методику, коли для забезпечення безпеки вводяться диференційовані частки повного запасу шляхом використання коефіцієнтів умов роботи матеріалів і характеристик матеріалів в певною забезпеченістю. У випадку дії середовища, що обумовлює складний характер пошкодження бетону, який характеризується зміною фізико-механічних характеристик бетону та координатами точки поперечного перерізу, а також зростанням кількості визначальних параметрів, такий підхід визиває істотні ускладнен-

Технологічні параметри бетону, які характеризують корозійну стійкість бетону, мають стохастичну природу. Мінливий характер мають також конструктивні параметри - міцність, сили (величина попереднього напруження), геометричні. Мінливий характер мають також зовнішні дії - навантаження і агресивне середовище. З погляду указаних причин необхідний імовірний підхід до розрахунку несучих залізобетонних конструкцій, які взаємодіють в агресивним середовищем.

Дослідження в галузі надійності структурно-складних систем (В.В.Болотін, А.Р.Ржаніцин, М.С.Стрелецький та ін.) засвідчують про формування єдиного методологічного підходу до розрахунку надійності на основі фізико-статистичного методу, що базується на фізико-хімічних закономірностях процесів накопичення пошкоджень матеріалів.

В роботі використовуються загальноприйняті поняття надійності - імовірність безвідказної роботи, імовірність відказу, інтенсивність відказів, середній термін служби, гамма-процентний термін служби (ресурс) та ін.

Показано, що задача визначення параметричної надійності конструкцій за тими чи іншими властивостями зводиться до одержання багатомірної функції щільності розподілення випадкового процесу. Через те, що одержати таку функцію в явному вигляді частіше всього неможливо, то достатньо визначити параметричну надійність конструкцій після закінчення визначеного часу її експлуатації, тобто визначити функцію надійності для фіксованих моментів часу, або, інакше, дати, так звану, точкову оцінку надійності. Конструкція задовольняє вимогам надійності, якщо імовірність безвідказної роботи за тими чи іншими власти-

востями вища або дорівнює нормованому рівню надійності.

Розроблено загальний системний підхід для вирішення задач оцінки і забезпечення надійності залізобетонних конструкцій в агресивних середовищах на основі фізико-статистичного методу, який містить: а) результати досліджень фізико-хімічних корозійних процесів і їх впливу на зміну міцнісних та деформативних характеристик бетону при дії агресивних середовищ; б) детерміновані залежності теорії залізобетону, що зв'язують показники властивостей конструкцій з їх параметрами і зовнішніми факторами - навантаженням і середовищем; в) статистичні дані про мінливість параметрів, які визначають властивості конструкцій; г) математичні методи теорії надійності, які дозволяють одержувати розподілення випадкових функцій при відомих розподіленнях аргументів; д) техніко-економічна та інша інформація, що дозволяє обґрунтувати рівень надійності властивостей конструкцій.

В другому розділі наведено короткий огляд виконаних досліджень, присвячених вивченню механізму процесів корозії бетону та залізобетону.

Кількісними характеристиками процесів корозії бетону, як показано в роботах Є.А.Гусєєва, Ф.М.Іванова, В.М.Москвіна та ін. можуть бути: кількість внесеного компоненту агресивного середовища, кількість внесеного компоненту цементного каменю, кількість новоутворень (продуктів взаємодії агресивного середовища і активних компонентів цементного каменю). Кількісною характеристикою процесу корозії I-го виду може бути величина внесених розчинних компонентів цементного каменю в перерахунок на окис кальцію. Кількісною характеристикою процесу корозії II-го виду може бути величина активних компонентів бетону (в

перерахунку на окис кальцію), які вступили у взаємодію з агресивною речовиною. Кількісною характеристикою при фізичній (содьовій) формі корозії III-го виду може бути ступінь заповнення порового простору бетону солями. Кількісно процес сульфатної корозії бетону можливо характеризувати величиною зв'язаних цементним каменем сульфат-іонів або ступенем заповнення пор осадом новоутворень. Корозія арматури в бетоні за наявності захисного шару і відсутності тріщин може виникати при зменшенні лужності оточуючого арматуру електроліту до рН менше деякого критичного значення в результаті карбонізації або корозії бетону, а також при дії іонів-активаторів (хлорид-іонів, сульфат-іонів та ін.).

Практичні (інженерні) методи розрахунку кінетики корозії бетону I-го виду (Ф.М.Іванов, Є.А.Гусєєв), II-го виду (Ф.М.Іванов, В.Г.Петров-Денисов), карбонізації бетону і терміну служби бетону захисного шару при дії іонів-активаторів (С.М.Алексєєв, М.К.Роєнталь, В.В.Яковлев) ґрунтуються на спрощених теоретичних уявленнях і експериментальних даних. Аналітичні моделі для прогнозу терміну служби бетону (А.Ф.Поллак, В.П.Сєляєв, В.І.Соломатов) не враховують реальні особливості процесу корозії бетону.

З метою окремого урахування різноманітних факторів, які визначають довговічність бетону, використовується спосіб розділення процесів накопичення пошкоджень на деякі умовно "прості" процеси, що дозволяє формалізувати процес корозії бетону, використовуючи положення теорії масопереносу, гетерогенних хімічних реакцій та механіки тьєршого деформованого тіла. Математичний підхід до опису корозійних процесів в бетоні стає можливим завдяки заміні реального бетону фізико-хімічною мо-

деллю пористим середовищем, що враховує основні властивості реального бетону. Параметри, які використовуються в моделі, являють собою деякі осереднені величини, що інтегрально визначають термодинамічні та кінетичні параметри сумарного процесу корозії. Вперше запропоновано таку систему диференціальних рівнянь, що описують дифузію, ускладнену хімічними реакціями, яка разом з крайовими умовами враховує найважливіші особливості процесу корозії бетону.

В третьому розділі розглядається один із найпоширеніших і складних корозійних процесів - взаємодія агресивного середовища, яке вміщує сульфати, з бетоном. На основі відомих даних про механізм процесу сульфатної корозії бетону і загальної математичної моделі, яка описує процес корозії при дифузії, що ускладнена хімічними реакціями, сформульовані рівняння, що описують взаємодію агресивного середовища, яке вміщує сульфати, з бетонним масивом прямокутного поперечного перерізу при двовірному процесі масопереносу. Отримана різницєва апроксимація диференціальних рівнянь масопереносу і розроблено алгоритм їх розрахунку.

Експериментальне визначення характеристик бетону в моделях масопереносу проведено на 39 серіях бетонних зразків, виготовлених із використанням широкої гами цементів (високо-, середньо- і низькокалорійних; без добавок і з активними добавками - мінеральними і шлаком), з варіюванням реакційної ємності (витратою цементу) та характеристиками проникності (В/Ц в діапазоні від 0,31 до 0,76), а також виду піску (кварцовий та карбонатний). Як агресивне середовище використовувались розчини сульфату натрію концентрацією від 1 до 67,8 г/л по сульфат-іону, а також двокомпонентний розчин сульфату і

хлориду натрію при різному співвідношенні сульфат- і хлорид-іонів. Для аналізу були використані і результати інших досліджень (В.І.Бабушкіна, С.А.Гузєєва, Ф.М.Іванова, Я.Ямбора та ін.).

В результаті регресійного аналізу експериментальних даних проведенню досліджень, а також досліджень інших авторів, виявлено залежності ефективного коефіцієнту дифузії сульфат-іонів в бетоні, а також константи швидкості хімічної реакції зв'язування сульфат-іонів активними компонентами цементного каменю залежно від визначальних параметрів: об'єму відкритих пор в бетоні, концентрації бікарбонатної лужності, напруженого стану, хіміко-мінералогічного та речовинного складу цементу, активних заповнювачів, концентрації хлорид-іонів, температури. На основі узагальнення експериментальних даних запропонована спрощена інженерна методика для опису поширення корозійних полів у просторі та часі при одномірному і багатомірному процесах масопереносу та стаціонарному режимі дії агресивного середовища.

З використанням одержаних експериментальних даних про параметри кінетики сульфатної корозії бетону чисельним та інженерним методами проведено розрахунок розподілення зв'язаних цементним каменем сульфат-іонів за різних умов взаємодії бетону і середовища. Порівняння з експериментальними даними засвідчує про задовільну схожимість розрахункових та експериментальних даних.

Четвертий розділ присвячений дослідженням механічного стану бетону при різноманітних діях. Аналіз виконаних досліджень в області розвитку методів розрахунку залізобетонних конструкцій в умовах комплексної дії навантаження та аг-

ресивних середовищ засвідчує, що перспективним напрямком є використання модельних уявлень залізобетонних елементів та рівнянь механічного стану матеріалів, які в формалізованому вигляді відображають результат дії середовища.

Для окремого урахування різноманітних факторів, які визначають характеристики бетону в умовах контакту з агресивними розчинами, був використаний спосіб розділення процесу корозії на деякі умовно "прості" конструктивні і деструктивні процеси. Ці процеси зв'язані із впливом води (адсорбційний ефект, гідратація цементу), а також, власне, корозійних процесів (накопичення новоутворень в структурі бетону, винесення розчинних компонентів цементного каменю та ін.), а також із впливом режиму навантаження. Запропоновано вирази для урахування впливу відзначених факторів на такі параметри рівнянь механічного стану бетону: міцність, модуль пружності, гранична деформативність при короткочасному стиску і розтягу, характеристика поважності, коефіцієнт корозійних лінійних деформацій.

При виборі аналітичних залежностей для опису діаграм деформування бетону при короткочасній і довготривалій дії навантаження в умовах розвитку корозійного процесу в структурі бетону виходили із наступних послань: залежність повинна ямичувати мінімальну кількість характеристик, які нормуються; враховувати можливість зміни цих характеристик внаслідок дії середовища і навантаження шляхом трансформування; задовольняти вимогам гладкості та неперервності; надавати достатню точність апроксимації експериментальних даних. Запропоновано загальний вираз для опису діаграм бетону при короткочасній дії навантаження в нормованих координатах сплайн-функцією та їх змін в умовах розвитку процесу корозії. Порівняння результатів

розрахунку для звичайних умов експлуатації бетону згідно запропонованій залежності, та апроксимуючим залежностям М.І.Карпенка та Т.А.Мухамедієва, а також пропозиціям ЄКБ - ФІП виявило їх задовільне співпадання.

При виборі теорії розрахунку деформацій бетону при довготривалій дії навантаження виходили із відповідності між точністю теорії та точністю вихідних даних. Експериментальні дослідження повазучості бетону в умовах розвитку корозійного процесу вкрай обмежені. Тому необхідний наближений, достатньо простий та прийнятний для практичних розрахунків метод урахування режиму навантаження, що містить мінімальну кількість параметрів, які нормуються. Таким умовам, на нашу думку, задовольняє параметрична теорія повазучості А.І.Чебаненко, методика діаграм-ізохрон М.І.Карпенко і Т.А.Мухамедієва, а також традиційна теорія пружно-повазучого тіла з корективами в інтерпретації Є.А.Гузєєва та ін, яка враховує ефект дії середовища.

Експериментальні дослідження закономірностей руйнування та деформування бетону проведено при дії агресивних розчинів сульфатів. В дослідях варіювались: хімічна активність внутрішньої поверхні бетону, реакційна емність бетону, структурні характеристики, концентрація сульфат-іонів та хлорид-іонів, тривалість експозиції зразків (до 8 років). На зразках у вигляді порожнистих циліндрів, приам визначались такі традиційні характеристики, як міцність при стиску та розтягу, модуль пружності, гранична деформативність при осьовому стиску, коефіцієнт лінійного корозійного розширення. Шляхом проведення рівноважних випробувань зразків на агин одержано повністю рівноважні діаграми деформування (ПРДД) бетону, по яким ідентифіковані характеристики бетону з позицій механіки

руйнування - енергія руйнування, коефіцієнт інтенсивності напружень та ін.

В результаті регресійного аналізу даних власних досліджень, а також інших авторів, одержані рівняння, які описують залежність між відносною зміною міцності бетону при стиску і розтягу, модуля пружності, граничної стисливості, характеристики поваучості, коефіцієнту корсетійних лінійних деформацій в залежності від кількості зв'язаних сульфат-іонів. Уточнена також залежність, яка встановлює зв'язок між відносною зміною міцності бетону в умовах вилуговання, в залежності від ступеня вилуговання.

П'ятий розділ присвячений розробці детермінованих моделей залізобетонних елементів для опису їх напружено-деформованого стану.

Рациональним методом оцінки напружено-деформованого стану (НДС) залізобетонних елементів є метод інтегрального модуля деформації В.М.Бондаренка. Разом з В.М.Бондаренко нами запропоновані положення використання методу інтегрального модуля у випадку дії "середовище-навантаження". Для середовища на бетон, зміна його міцності та деформативності оцінюється розрахунковою зміною перерізів при наданні їм комплексу попередніх властивостей (аналогічно методу приведених перерізів). Одержано вирази інтегрального модуля деформацій в залежності від силової нелінійності та інтенсивності зовнішніх силових дій. Автором запропоновано також чисельно-аналітичний метод оцінки зусиль, що сприймаються бетоном. Головна відмінність від раніше запропонованих методів (чисельного інтегрування і прямого інтегрування) полягає в кусочній апроксимації підінтегральної функції напружень на характерних ділянках зміни фізи-

ю-механічних характеристик та геометричних параметрів конструкцій аналітичними функціями (Інтерполяційними поліномами)..

Великим питанням при розрахунку залізобетонних елементів з комплексними перерізами являється визначення критерію руйнування. Процес руйнування залізобетонних елементів з неоднорідними фізико-механічними характеристиками бетону моделюється з використання фізичних критеріїв - критерію максимуму функції рівноважних станів для всього перерізу цілому, або текучості арматури чи обмеження величини граничних деформацій арматури з метою запобігання розвитку надмірних деформацій або розриву арматури. З використанням критерію максимуму функції рівноважних станів можливо визначити міцність нормальних перерізів залізобетонних елементів у випадку руйнування по бетону стиснутої зони поза зв'язком з граничною висотою стиснутої зони. Проведені розрахунки міцності згинальних залізобетонних елементів у звичайних умовах підтвердили критерій руйнування перерізів, а також засвідчили достатню точність розрахунку порівняно з методикою розрахунку міцності згідно чинних норм. Запропоновані методи оцінки НДС з використанням рівнянь механічного стану та кінетичних залежностей корозійного процесу дозволяють на всіх стадіях розвитку корозійного процесу, на усіх стадіях навантаження з єдиних позицій оцінювати міцність, тріщиностійкість та деформативність елементів.

Розроблені експериментальна методика та устаткування дозволили вперше одержати діаграми рівноважних станів перерізів, нормальних до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів, при дії агресивного середовища (розчинів сульфату натрію) і короткочасному навантаженні. Експериментально

підтверджені критерії руйнування елементів в перерізах, нормальних до поздовжньої осі. Експериментально виявлено, що дія агресивного середовища при визначених умовах викликає як кількісні, так і якісні зміни механізму руйнування - із категорії слабоармованих (руйнування по арматурі розтягнутої зони) конструкції можуть переходити в категорію переармованих (руйнування по бетону стиснутої зони), і навпаки. Експериментально доказано, що однакова міра корозійних пошкоджень викликає різні зміни напружено-деформованого стану залізобетонних елементів в залежності від конструктивних параметрів (ступеня армування). Співставлення дослідних і розрахункових даних засвідчує, що методика з достатньою точністю оцінює міцність і деформативність залізобетонних елементів в умовах дії середовища та навантаження і може служити основою для прогностичних детермінованих та імовірних розрахунків.

Із застосуванням запропонованих методів оцінки НДС, кінетичних залежностей розвитку корозійних процесів, рівнянь механічного стану бетону виконано прогностичні детерміновані розрахунки зміни характеристик НДС залізобетонних елементів (позацентрово стиснутих та згинальних) при розвитку деяких процесів корозії (I і III видів). Результати експериментальних досліджень та чисельного моделювання підтвердили гіпотезу про значимий вплив конструктивних параметрів на зміни характеристик НДС залізобетонних елементів в умовах розвитку корозійних процесів в бетоні. Конструктивні параметри - форма і розміри перерізів, ступінь армування, фізико-механічні характеристики бетону та арматури, у визначених випадках, можуть бути ефективними засобами первинного захисту від корозії. В результаті аналізу даних чисельних експериментів в'ясована

фізична суть закономірностей впливу конструктивних параметрів на зміну міцності залізобетонних елементів за нормальними перерізами.

Шостий розділ присвячений узагальненню даних про мінливість конструктивно-технологічних параметрів залізобетонних конструкцій, що визначають їх надійність та довговічність.

Виконаний статистичний аналіз мінливості міцності бетону і арматури засвідчує, що їх фактична забезпеченість не нижча тої, яка нормується. Проведені дослідження фактичної мінливості геометричних параметрів засвідчують, що вона суттєво перевищує ту, яка нормується і регламентується системою забезпечення геометричної точності в будівництві. Так, фактична мінливість захисного шару в 1,5...7,2 разів, а геометричних розмірів - в 1,2...26,6 разів перевищує ту, яка нормується. Встановлено залежності фактичної мінливості захисних шарів та геометричних параметрів конструкцій. Проведені дослідження величини попереднього напруження виявили суттєву нерівномірність зусилля обтискування окремих арматурних стержнів в межах поперечного перерізу елементів. Виконано збір і статистичний аналіз хіміко-мінералогічного складу клінкерів-цементів заводів України. Виявлено, що мінливість мінералогії цементів окремих заводів суттєво відрізняється.

Одержані дані про мінливість визначальних параметрів разом із методикою оцінки надійності надають можливість виконати оцінку надійності залізобетонних елементів, що працюють в умовах дії агресивних середовищ.

В сьомому розділі досліджується надійність залізобетонних елементів, які працюють в нормальних волого-теплових умовах з метою встановлення нормованого рівня. Виконано аналіз відомих

методів побудови розподілень складних функцій: аналітичних (перетворення випадкових величин, послідовної заміни випадкових аргументів, лініаризації або моментів, еквівалентних збурень) та чисельних (метод чисельного інтегрування, статистичних випробувань або Монте-Карло). Запропоновано чисельно-аналітичний метод визначення розподілень складних функцій, основою якого є метод лініаризації функції інтерполяційним поліномом на відміну від лініаризації функції методом Тейлора. Цей метод є достатньо простим, зберігає інженерно-оглядаємий і контрольований вигляд, забезпечує достатню точність розрахунку, дозволяє використовувати аналітичний метод побудови розподілень для функцій, що не визначаються в явному вигляді, дозволяє зменшити похибку, визвану нелінійністю функції, урахувати можливість перебування функції на різних ділянках. При відомих перших чотирьох моментах розподілення функції в перерізі випадкового процесу можливо вибрати апроксимуюче розподілення із сім'ї розподілень Джонсона або із класу розподілень Пірсона.

Для встановлення нормованого рівня надійності проведено аналіз надійності реальних залізобетонних конструкцій за різними функціональними властивостями - міцністю, деформативністю, тріщиностійкістю. При цьому використані результати як власних досліджень, так і інших авторів. Дані засвідчують про суттєву нерівнонадійність різних функціональних властивостей одних і тих же конструкцій, а також про суттєву відмінність рівня надійності різних конструкцій за одними і тими ж функціональними властивостями.

Для встановлення рівня проектної та фактичної (при урахуванні фактичної міцності параметрів) надійності залізобетон-

них конструкцій, що проектується згідно сучасних норм, проведено дослідження надійності згинальних залізобетонних елементів за міцністю нормальних перерізів при зміні конструктивних параметрів (розмірів поперечних перерізів і їх співвідношень, ступеня армування). З'ясовано, що надійність елементів при урахуванні фактичної мінливості параметрів нижча їх надійності при урахуванні нормованої мінливості визначальних параметрів, що пояснюється більш високою фактичною мінливістю геометричних параметрів. З'ясовано, що в діапазоні, де міцність перерізів визначається одним матеріалом, їх забезпеченість наближена до забезпеченості міцності матеріалів; там, де міцність перерізів визначається арматурою і бетоном, їх забезпеченість більш висока, що можливо пояснити низькою імовірністю одночасного попадання в конструкцію матеріалів з мінімальними значеннями міцності.

Вперше проведено аналіз надійності за міцністю нормальних перерізів залізобетонних елементів із застосуванням фізичної моделі, в якій використовуються діаграми робіт бетону і арматури із урахуванням їх мінливості. Результати проведених досліджень підтвердили основні встановлені закономірності зміни надійності елементів в залежності від конструктивних параметрів і їх мінливості (нормованої та фактичної), що і при застосуванні формул норм проектування. З'ясовано, що в масивних елементах ( $h=50$  см) при урахуванні фактичної мінливості геометричних параметрів існує зайва надійність в усьому діапазоні зміни ступеня армування; в елементах середньої масивності ( $h=30$  см) при певному ступені армування існує як зайва, так і недостатня надійність; в немасивних елементах ( $h=10$  см) надійність недостатня в усьому діапазоні зміни армування.

З врахуванням одержаних результатів, а також практики експлуатації конструкцій в нормальних волого-теплових умовах, як нормований рівень надійності залізобетонних конструкцій за міцністю перерізів, які нормальні до поздовжньої осі, можливо вважати рівень забезпеченості, що характеризується імовірністю безвідкавної роботи 0,99865.

Для з'ясування виявлених закономірностей зміни надійності залізобетонних елементів були проведені дослідження впливу конструктивних параметрів на зміну міцності перерізів. З'ясовано діапазони армування для яких є характерним вагомий вплив міцності бетону і арматури, а також типи конструкцій, для яких є вагомим вплив геометричних параметрів. З'ясовано, що деякі характеристики діаграм деформування матеріалів, виявились практично незначущими в забезпеченні міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів.

У восьмому розділі реалізовано запропонований системний підхід на основі фізико-статистичного методу оцінки надійності для вирішення деяких задач, зв'язаних з прогнозуванням надійності залізобетонних конструкцій в агресивних середовищах.

Сучасний рівень знань і техніка контролю стану арматури включає можливість брати до уваги в розрахунках довговічності будь-яку ступінь корозії арматури і втрати її зачеплення з бетоном, що забезпечується виключенням можливості утворення тріщин або обмеження ширини їх розкриття та призначенням певної величини та технологічних параметрів бетону захисного шару. Таким чином, розрахунок умов збереження арматури вміщує: а) традиційні розрахунки утворення і розкриття тріщин з урахуванням кінетики корозійних процесів в бетоні; б) розрахунок

кількості внесеного (внесенного) компоненту агресивного середовища (цементного каменю) або продуктів їх взаємодії, небезпечної за критеріями виникнення корозії арматури, порушення її зчеплення з бетоном, руйнування захисного шару. Запропонована імовірна методика розрахунку надійності бетону захисного шару за згаданими критеріями. Як приклад, приведено рішення задачі оцінки надійності та довговічності бетону захисного шару в умовах дії кислоти.

З метою співставлення результатів, які отримані напівімовірним методом (граничних станів) та імовірним методом, проведено розрахунки міцності аригальних елементів, що працюють в рідких сульфатних середовищах, агресивних за ознакою корозії III-го виду. За методом граничних станів надійність міцності конструкцій на стадії проектування забезпечується шляхом введення розрахункових значень опору бетону і арматури. Через те, що розрахунок проводиться з урахуванням кінетики корозії бетону, на яку впливають технологічні параметри, то, очевидно, необхідно урахувати і їх мінливість, тобто прийняти їх з певною забезпеченістю. Результати розрахунку свідчать, що напівімовірний метод забезпечує або недостатню надійність по міцності (менше 0,99865), якщо не враховувати мінливість технологічних параметрів (при введенні їх в розрахунок з забезпеченістю 0,5), або зайву надійність (забезпеченість міцності багато більша 0,99865) при введенні в розрахунок технологічних параметрів із забезпеченістю 0,95 і 0,99865. Таким чином, напівімовірний метод в сучасній формі не вирішує з достатньою повнотою задачу проектування надійних і економічних несучих конструкцій в агресивних умовах. Ці результати є наслідком того, що при збільшенні кількості визначальних параметрів, не-

обхідно використовувати положення імовірного розрахунку, який враховує закономірності одночасного попадання в конструкції параметрів з несприятливими їх значеннями.

З використанням імовірного фізико-статистичного методу проведено дослідження впливу карбонатних заповнювачів на надійність міцності згинальних залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону. Вперше визначено кількісні показники надійності та довговічності залізобетонних конструкцій, що працюють в умовах дії агресивних середовищ: імовірність відказів, середній термін служби, гама-процентний ресурс, інтенсивність відказів та ін.

Проведено оцінку впливу конструктивно-технологічних параметрів на забезпечення міцності з метою їх ранжування. З'ясовано, що при низьких концентраціях сульфат-іонів регулювання довговічності конструкцій раціонально здійснювати конструктивними параметрами, а при високих - технологічними.

Для визначення економічної ефективності проектування залізобетонних конструкцій з урахуванням кінетики корозії бетону проведено варіантне проектування антикорозійного захисту фундаменту згідно серії 1.412-1/77; елементу підпірної стіни згідно серії 3.002.1-1 в умовах дії ґрунтових вод, що містять сульфати, а також огорожуючих конструкцій овочесховища з регульованим газовим середовищем при дії двоокису вуглецю. Розрахунки засвідчують, що в усіх випадках, що розглядалися, при проектуванні конструкцій з урахуванням кінетики корозії бетону, отримано більш економічні рішення антикорозійного захисту у порівнянні з прийнятими в даний час типовими.

При проектуванні конструкцій, призначених до експлуатації в умовах дії агресивних середовищ, необхідно визначити

конструктивно-технологічні параметри, які забезпечують заданий термін служби, або довговічність конструкцій з заданими параметрами для обґрунтування необхідності використання вторинного захисту або планування ремонтів. Вирішення цих та інших задач можливо на трьох рівнях проектування: дослідницькому, інженерному, рецептурному. Методика дослідницького рівня проектування реалізована в даній роботі.

Зважається, що сучасні методи розрахунку за своєю формою повинні залишатися детерміністичними, оскільки імовірні методи до цього часу є складними і недоступними інженерам-проектувальникам. Тому необхідний і інженерний рівень проектування. Враховуючи положення імовірного розрахунку, запропонована детермінована форма запису умови надійності для прикладних розрахунків. Для цього введено поняття про функцію безпеки (функцію умов роботи), яка враховує культуру технології виробництва, вплив параметрів первинного захисту, агресивних дій і змін функціональних властивостей конструкцій за часом. Функція безпеки визначається шляхом апроксимації результатів чисельного моделювання властивостей залізобетонних конструкцій при варіюванні вихідних параметрів, їх статистичних характеристик, терміну експлуатації конструкцій. Апроксимація результатів чисельного моделювання може здійснюватися методами планування експериментів, методом Д.Брандона та ін.

В даний час агресивні дії середовищ в нормах проектування враховуються на рецептурному рівні. Більш коректним, на нашу думку, при установленні ступеня агресивності середовища є врахування не тільки технологічних, але і конструктивних параметрів первинного захисту. Приведено можливі рішення задачі нормування корозійної небезпеки середовища (на прикладі суль-

фатних розчинів) по відношенню до аригальних залізобетонних елементів, які відрізняються конструктивними параметрами.

Порівнюючи запропоновані рівні проектування, можливо зробити наступні висновки: при проектуванні на першому рівні можливо отримати найбільш економічні рішення шляхом оптимізації конструктивно-технологічних параметрів; при проектуванні на третьому рівні можливі неекономічні рішення, особливо для конструкцій, які проектуються на відомий термін служби.

### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

В результаті проведених досліджень розроблено основи розрахунку надійності залізобетонних конструкцій в агресивних середовищах, що є сучасним вирішенням актуальної проблеми і має важливе наукове та народногосподарське значення.

1. Розроблено загальний системний підхід до вирішення задач, зв'язаних з оцінкою надійності залізобетонних конструкцій в умовах агресивних дій, який ґрунтується на фізико-статистичному методі та містить:

а) фізичні та математичні моделі: процесів масопереносу з урахуванням хімічних реакцій; процесів накопичення пошкоджень в бетоні; детермінованих моделей залежності властивостей конструкцій від визначальних параметрів, імовірного функціонування конструкцій;

б) аналітичні, чисельні, чисельно-аналітичні та інженерні методи рішення моделей;

в) експериментальне визначення: характеристик бетону в моделях масопереносу; фізико-механічних та реологічних характеристик бетону, як функцій кількісної характеристики накопичення корозійних пошкоджень; статистичних характеристик мініли-

вості параметрів бетону, конструкцій, середовища, умов їх взаємодії;

г) нормування: термінів служби або міжремонтних термінів експлуатації конструкцій; параметрів агресивного середовища (корозійного навантаження); силового навантаження; граничних значень функціональних властивостей конструкцій; рівня надійності функціональних властивостей конструкцій.

2. Запропоновано основні положення і принципи розрахунку та проектування залізобетонних конструкцій, призначених для роботи в умовах дії агресивних середовищ:

а) розрахунок і проектування залізобетонних конструкцій, які взаємодіють з агресивним середовищем, виконується з урахуванням кінетики корозії бетону;

б) дія середовища оцінюється за критерієм впливу на функціональні властивості несучих залізобетонних конструкцій;

в) фактор часу вводиться в розрахунок у явному вигляді шляхом регламентації терміну служби або визначення довговічності конструкцій;

г) розглядається надійність за внутрішніми властивостями згідно припущенню, що регламентовані нормами показники граничних значень властивостей забезпечують функціональну надійність конструкцій;

д) використовується принцип рівнонадійності конструкцій, які проектується для агресивних і неагресивних умов експлуатації (на кінець розрахункового терміну служби).

3. Запропоновано фізичну і математичну модель корозії бетону при дифузії, що ускладнена хімічними реакціями, яка дозволяє урахувати найважливіші особливості процесу корозії: залежність швидкості процесу від концентрації компонентів аг-

агресивного середовища і активних компонентів цементного каменю; багатокomпонентність агресивного середовища; паралельність хімічних реакцій; залежність проникності бетону від вихідних характеристик структури, напруженого стану, температури, ступеня розвитку корозійного процесу; залежність константи швидкості хімічної реакції від хіміко-мінералогічного і речовинного складу цементу, виду і складу супутніх іонів в багатокomпонентній системі агресивного середовища, температури; багатомірність процесу; можливу зміну концентрації компонентів агресивного середовища і температури в часі згідно будь-якому закону. Параметри, які використовуються в моделі (ефективний коефіцієнт дифузії, константа швидкості хімічної реакції) являють собою осереднені величини, інтегрально визначаючі термодинамічні та кінетичні параметри процесу корозії.

4. Розроблені методики експериментальних досліджень кінетики сульфатної корозії бетону, узагальнення даних проведених досліджень, а також досліджень інших авторів, дозволили виявити кількісні залежності ефективного коефіцієнту дифузії сульфат-іонів від кількості відкритих пор в бетоні, концентрації бікарбонатної лужності, напруженого стану, а також константи швидкості хімічної реакції зв'язування сульфат-іонів активними компонентами бетону: хіміко-мінералогічного і речовинного складу цементу, вмісту активних карбонатних заповнювачів, концентрації супутніх хлорид-іонів, температури.

5. Розроблено спрощену інженерну методику для опису розподілення корозійних полів у просторі та часі при одномірному і багатомірному процесі масопоренсусу і стаціонарному режимі дії агресивного середовища.

6. Запропоновано загальні аналітичні залежності для опису

аміни міцнісних і деформативних характеристик бетону при дії агресивних середовищ. Одержано значний обсяг експериментальних даних про аміни міцнісних та деформативних характеристик бетону при сульфатній корозії. В результаті статистичної обробки експериментальних даних встановлено кількісні залежності впливу накопичення новоутворень в структурі бетону при сульфатній корозії на міцнісні та деформативні характеристики бетону; уточнена залежність, яка встановлює зв'язок між зміною міцності бетону в умовах вилугування як функції ступеня вилугування.

7. Вдосконалено методи розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) стержньових залізобетонних елементів за нормальними перерізами в частині: розвитку засобів оцінки зусиль, що сприймаються бетоном з урахуванням складного характеру зміни властивостей бетону по глибині фронту корозії; розробки критерію руйнування елементу з неоднорідними фізико-механічними характеристиками бетону по перерізу (критерій максимуму функції рівноважних станів), у випадку руйнування по бетону стиснутої зони (пова зв'язком з граничною висотою стиснутої зони). Запропоновані методи використовують модельні уявлення залізобетонних елементів і рівняння механічного стану арматури і бетону, які в формалізованому вигляді відображають результат дії середовища. Методи розрахунку НДС дозволяють на усіх стадіях розвитку корозійних процесів, на усіх стадіях навантаження з єдиних позицій оцінювати міцність, тріщиностійкість і деформативність елементів.

8. Розроблені експериментальні методики і проведені експериментальні дослідження дозволили одержати діаграми рівноважних станів аригальних залізобетонних елементів, вклю-

включаючи і "закритичну" стадію роботи; виявити особливості впливу агресивних сульфатних розчинів на зміну напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, які відрізняються конструктивними особливостями; підтвердити критерії міцності перерізів, нормальних до поздовжньої осі; виявити достатню точність запропонованих методів оцінки напружено-деформованого стану.

9. Результати чисельного моделювання підтвердили гіпотезу про значимий вплив конструктивних параметрів на зміну характеристик напружено-деформованого стану залізобетонних елементів в умовах розвитку корозійних процесів в бетоні. З'ясована фізична суть закономірностей впливу конструктивних параметрів на зміну міцності залізобетонних елементів за нормальними перерізами. Встановлено, що конструктивні параметри, в окремих випадках, можуть бути ефективними засобами первинного захисту від корозії.

10. Узагальнено статистичні дані про мінливість конструктивно-технологічних параметрів залізобетонних конструкцій, які визначають їх надійність в умовах дії агресивних середовищ. Встановлено залежності фактичної мінливості захисних шарів бетону і геометричних параметрів залізобетонних конструкцій.

11. Розроблено чисельно-аналітичний метод визначення розподілень складних функцій, які описують функціональні властивості залізобетонних конструкцій. Він дозволяє застосовувати аналітичний метод побудови розподілень функцій, що не визначаються в явному вигляді, зменшити загальну похибку, визвану нелінійністю функції, урахувати можливість перебування функції на різних ділянках визначення аргументів.

12. Для встановлення нормованого рівня надійності залізобетонних конструкцій проведено аналіз їх надійності при фактичній і мінімальній міцності визначальних параметрів на основі детермінованих залежностей норм проектування при зміні конструктивних параметрів (ступеня армування, форми і розмірів поперечних перерізів). Вперше проведено аналіз надійності залізобетонних елементів на основі методу оцінки НПС, в якому використовуються діаграми бетону і арматури з урахуванням їх міцності. Встановлено, що за нормований рівень надійності залізобетонних конструкцій за міцністю перерізів, нормальних до подовжньої осі, можливо прийняти рівень імовірності безвідказної роботи 0,99865.

13. В результаті ранжування конструктивних параметрів згідно критерію впливу на забезпечення надійності нормальних перерізів аригальних залізобетонних елементів, виявлено діапазони армування, для яких є характерним визначальний вплив міцності бетону або арматури, а також типи конструкцій, для яких визначальним є вплив геометричних параметрів.

14. Розроблено методику розрахунку надійності бетону захисного шару, який забезпечує абереження арматури. На її основі, а також кінетичних залежностях корозійних процесів, даних про міцність визначальних параметрів бетону і величини захисного шару можливо вирішувати задачі визначення довговічності або регламентації конструктивно-технологічних параметрів, які забезпечують заданий термін служби. Як приклад, приведено рішення задачі оцінки надійності захисного шару в умовах дії агресивного середовища.

15. Реалізовано фізико-статистичний метод оцінки надійності залізобетонних конструкцій, які працюють в умовах

ді агресивних середовищ. Вперше встановлено кількісні показники надійності та довговічності конструкцій при сульфатній корозії бетону. В результаті співставлення даних розрахунку міцності залізобетонних елементів в умовах розвитку процесу корозії напівімовірним та імовірним методами показано, що чинний в даний час напівімовірний метод не вирішує в достатню повноту задачу проектування надійних і економічних конструкцій. Це впливає з того, що при зростанні кількості визначальних мінливих параметрів, необхідно використовувати імовірний розрахунок, який враховує закономірності одночасного попадання в конструкції параметрів з несприятливими їх значеннями.

16. Вперше проведено варіантне проектування антикорозійного захисту деяких залізобетонних конструкцій з урахуванням кінетики розвитку процесів корозії бетону. Показано, що при цьому можливо отримати більш економічні рішення антикорозійного захисту порівняно з типовими рішеннями, що використовуються сьогодні.

17. Викладено пропозиції для норм проектування по рішенням задач, пов'язаних із забезпеченням надійності залізобетонних конструкцій в умовах агресивних дій середовища на трьох рівнях проектування: дослідницькому, інженерному, рецептурному. З урахуванням положень імовірного розрахунку запропоновано детерміновану форму залісу умови надійності на інженерному рівні, яка ґрунтується на понятті про функцію безпеки, запропоновано також методики її отримання.

Зміст роботи відображений в більш, ніж 50 працях автора, серед яких основними є такі:

1. Бояркин В.М., Савицкий Н.В. Критерии надежности по прочности и жесткости преднапряженных панелей перекрытий из легкого бетона // Бетоны на пористых заполнителях Дальнего Востока и их применение в строительстве. II часть. - Владивосток: Дальневосточный ПромстройНИИпроект, 1980. - с. 86-93.

2. Бояркин В.М., Савицкий Н.В. К методике оценки долговечности железобетонных конструкций на основе экспертных оценок // Повышение долговечности конструкций водохозяйственного назначения. - Ростов-на-Дону: РИСИ, 1981. - С. 24-27.

3. Савицкий Н.В., Гузеев Е.А., Бондаренко В.М. Интегральный метод оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов в случае воздействия агрессивной среды и силовой нагрузки // Коррозионная стойкость бетона и железобетона в агрессивных средах / Тр. НИИЖБ. - М.: Стройиздат, 1984. - С. 20-28.

4. Рекомендации по оценке состояния железобетонных конструкций при эксплуатации в агрессивных средах // М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1984. - 34с.

5. Рекомендации по определению срока службы железобетонных конструкций реконструируемых предприятий черной металлургии и тяжелого машиностроения // Харьков: Харьковский ПромстройНИИпроект - НИИЖБ Госстроя СССР, 1984. - 41 с.

6. Савицкий Н.В. Именчивость геометрических параметров железобетонных конструкций // Расчет, конструирование и технология изготовления бетонных и железобетонных изделий / Тр. НИИЖБ. - М.: Стройиздат, 1985. - С. 92-95.

7. Гузеев Е.А., Савицкий Н.В. Основные принципы обеспечения долговечности железобетонных конструкций на стадии проектирования с учетом кинетики коррозионных процессов бетона //

Совершенствование технологии производства бетонов повышенной прочности и долговечности. - Уфа : НИИпромстрой, 1985. - С. 124-127.

8. Савицкий Н.В. Оценка напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов в случае воздействия агрессивной среды и нагрузки // Технология, расчет и конструирование железобетонных конструкций. - М.: НИИЖБ, 1986. - С. 107-110.

9. Рааживин А.В., Савицкий Н.В., Гузеев Е.А. К расчету полей концентрации агрессивной среды в конструкциях методом конечных элементов // Деп. в ВИНТИ 20.11.86, N 7912-В86.-1986. - 12 с.

10. Савицкий Н.В., Борисенко В.М., Еркинбеков А.Е., Спатаев И.О. Оценка надежности железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред // Способы повышения коррозионной стойкости бетона и железобетона. - М.: НИИЖБ, 1986. - С. 53-59.

11. Савицкий Н.В., Гузеев Е.А. Численно-аналитический метод оценки надежности и долговечности железобетонных конструкций // Повышение долговечности строительных конструкций в агрессивных средах. - Уфа: НИИпромстрой, 1987. - С. 33-34.

12. Гузеев Е.А., Савицкий Н.В., Тютюк А.А. Оценка агрессивности растворов сульфатов к бетонам на шлакопортландцементе // Строит. материалы и конструкции, 1988 N 4. - С. 32.

13. Пунагин Б.Н., Приходько А.П., Савицкий Н.В. Долговечность бетонных и железобетонных изделий и конструкций: Учеб. пособие // Киев: УМК ВО, 1988. - 112 с.

14. Гузеев Е.А., Савицкий Н.В., Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетона третьего вида //

Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах / М.: НИИЖБ, 1988. - С. 16-20.

15. Савицкий Н.В., Хамрик А.В. Расчет долговечности бетона в сульфатных растворах // Энергосберегающие технологии, эффективные строительные материалы и конструкции для промышленного и гражданского стр-ва. - Днепропетровск: ЛИСИ, 1989. - С. 48.

16. Савицкий Н.В., Краснюк Т.В., Ракутумаву Ф.А. Формализация процессов коррозии бетона в расчетах элементов железобетонных конструкций // Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформаций, и их внедрение в строительную практику. - Полтава: ЛИСИ, 1989. - С. 165-167.

17. Савицкий Н.В. Экспериментально-теоретические исследования влияния сульфатных растворов на напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов // Там же. - Полтава: ЛИСИ, 1989. - С. 53-55.

18. Савицкий Н.В. Прогнозирование ресурса бетона в условиях агрессивных воздействий по результатам натуральных обследований // Современные методы оценки технического состояния конструкций зданий и мероприятия по их усилению. - Красноярск: ПромстройНИИпроект, 1989. - С. 106-111.

19. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении / Харьковский ПромстройНИИпроект, - М.: Стройиздат, 1990. - 176 с.

20. Гузев Е.А., Борисенко В.М., Савицкий Н.В. Механоматематические методы прогноза долговечности железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. - 1990, № 3. - С. 17-19.

21. Савицкий Н.В., Гузев Е.А., Ракутумаву Ф.А., Тытук А.А. Системный подход в проектировании первичной защиты железобетонных конструкций // Эксплуатационная надежность инженерных сооружений при сложных нагружениях и воздействия внешней среды. - Ташкент: ТАШИИТ, 1990. - С. 85-87.

22. Савицкий Н.В. Системный подход как методология решения задач обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Защита подвешенных железобетонных конструкций от коррозии. - Волгоград: КТБ НИИЖЕ, 1990. - С. 55-61.

23. Гузев Е.А., Савицкий Н.В., Тытук А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов с учетом кинетики сульфатной коррозии бетона // Защита бетона и железобетона от коррозии. - М.: НИИЖЕ, 1990. - С. 59-66.

24. Разживин А.В., Савицкий Н.В. Применение метода конечных элементов в расчетах конструкций, подверженных воздействию жидких агрессивных сред / Численные методы решения задач строительной механики транспортных сооружений // Мелбув. сб. науч. тр. вып. N 627. - М.: МИИТ, 1990. - С. 115-120.

25. Савицкий Н.В., Тытук А.А. Нормирование химико-минералогического состава цементов для конструкций, предназначенных для эксплуатации в агрессивных средах // Расчет, конструирование и технология изготовления бетонных и железобетонных изделий. - М.: НИИЖЕ, 1990. - С. 117-120.

26. Савицкий Н.В., Тытук А.А. Нормирование коррозионной опасности среды по отношению к железобетонным конструкциям // Защита строительных конструкций от коррозии. - Пенза: ЦЭНТЭ, 1991. - С. 44-45.

27. Савицкий Н.В., Изгорная Т.Ф. Долговечность железобе-

тонных конструкций, работающих в агрессивных средах // Материалы XXIII Международной конференции в области бетона и железобетона. - М.: Стройиздат, 1991. - С. 375-377.

28. Савицкий Н.В., Ракутумаву Ф.А. Прогноз долговечности железобетонных конструкций // Повышение эффективности и качества строительства в новых условиях хозяйствования. - Киев: УМК ВО, 1992. - С. 101-110.

29. Савицкий Н.В. Расчет несущих железобетонных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой // Математические методы в задачах расчета и проектирования сложных технических систем. - Киев: АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова. - 1992. - С. 58-62.

30. Гузев Е.А., Алексеев С.Н., Савицкий Н.В. Учет агрессивных воздействий в нормах проектирования конструкций // Бетон и железобетон. - 1992, N 10. - С. 8-10.

31. Краснюк Т.В., Почтман Ю.М., Савицкий Н.В. Долговечность и оптимальное проектирование ограждающих железобетонных конструкций, работающих в агрессивных средах // Прочность конструкций в экстремальных условиях / Межвузовский научный сборник. - Саратов: СПИ, 1992. - С. 79-84.

32. Савицкий Н.В., Гузев Е.А., Бородин А.А. Модель переноса химически агрессивной среды в бетоне // Материалы XXIV Международной конференции по бетону и железобетону. - М.: Стройиздат, 1992. - С. 176-177.

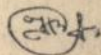
33. Савицкий Н.В. Результаты оценки начальной надежности изгибаемых железобетонных элементов // Надежность зданий и сооружений. - Черкассы: ЧТИ, 1993. - С. 22-24.

34. Савицкий Н.В., Тытэк А.А., Федорчук В.И., Колохов В.В. Диагностика технического состояния защитных оболочек

атомных электростанций // Надежность зданий и сооружений. - Черкассы: ЧИТИ, 1993. - С. 25-26.

35. Савицкий Н.В., Колохов В.В. О совершенствовании методики диагностики и оценки надежности локализуемых систем безопасности атомных электростанций // Материалы для строительства / Тезисы докладов II Международной научно-технической конференции ИСМВ'93. - Днепропетровск: ДИСИ, 1993. - С. 230-231.

36. Савицкий Н.В. Расчет надежности и долговечности железобетонных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой // Математическое моделирование задач прочности и оптимального проектирования конструкций / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова. - Киев: 1993. - С. 32-37.



Подписано к печати 13.12.93. формат 60x84 1/16,  
Усл.печ.л.2,25, заказ .44, тираж 100, ДТН

AB 29.056