

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ

Борзяк Ольга Сергіївна

УДК 620.193.7:691.32

**МЕХАНІЗМ ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ БЕТОНУ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
КОНСТРУКЦІЙ В СКЛАДНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

**05.23.05** – будівельні матеріали та вироби

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2010

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Однією з основних проблем експлуатації електрифікованих залізничних колій, бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій штучних споруд, підрейкових основ, а також конструкцій будівель та споруд, розташованих поблизу електрифікованих залізничних колій, є їх захист від електрокорозійного руйнування під впливом струму витoku й блукаючого струму, що виникають при русі поїздів з електричною тягою.

Одними з основних причин руйнування цих конструкцій є недосконалість наявних уявлень про електрокорозію залізобетону, неприйняття багатьма вченими можливості електрокорозії бетону, відсутність у нормативних документах вимог із захисту від електрокорозії бетону в залізобетонних конструкціях. Існуючі уявлення про механізм електрокорозії залізобетонних конструкцій в умовах обводнення і струмів витoku (складні умови експлуатації) не відповідають дійсному.

У зв'язку із цим тема дисертації, присвячена розробці реальних уявлень про механізм електрокорозії бетону в залізобетонних конструкціях у складних умовах експлуатації, способам захисту від електрокорозії бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій, є актуальною та значимою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі "Будівельні матеріали, конструкції та споруди" Української державної академії залізничного транспорту (УкрДАЗТ).

Виконання роботи здійснювалося у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи УкрДАЗТ за темою "Розробка теоретичних та експериментальних основ захисту від електрокорозії споруд залізничного транспорту" (№ДР 0108U000076), а також у рамках госпдоговорів з СТГО «Південна залізниця» та іншими організаціями.

**Мета дослідження** – розробка уявлень про механізм електрокорозії обводненого бетону під дією постійного струму на електрифікованому транспорті на основі уявлень про електроповерхневі властивості, явища, процеси та взаємодії у дисперсних системах і використання цих уявлень для підвищення довговічності бетонних, кам'яних і залізобетонних конструкцій у складних умовах експлуатації.

**Наукова гіпотеза** – електрокорозія бетону в бетонних і залізобетонних конструкціях обумовлена інтенсифікацією вилужування

цементного каменю й тріщиноутворення бетону за рахунок розчинення портландиту та електроміграційного винесення продуктів його розчинення у воду або водонасичений ґрунт під впливом пульсуючого односпрямованого постійного електричного поля на рейках і конструкціях.

**Завдання дослідження:**

1) узагальнення й аналіз існуючих теоретичних та експериментальних досліджень з метою виявлення механізмів дії блукаючих струмів і струмів витоку на конструкції;

2) розробка методик дослідження електрокорозійного стану обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій в експлуатаційних умовах, а також методик лабораторних досліджень;

3) розробка фізико-математичних моделей електрокорозії бетону і її впливу на зміну властивостей бетону в часі;

4) проведення на підставі розроблених методик обстеження конструкцій, що руйнуються в умовах обводнення і струмів витоку;

5) проведення комплексних лабораторних досліджень, у т.ч. фізико-хімічних, що підтверджують або уточнюють наукову гіпотезу й розкривають механізм електрокорозії бетону, її вплив на міцність, водопроникність та інші властивості бетону;

6) встановлення вимог до матеріалів та способів, що забезпечують захист бетону від електрокорозії, розробка нових захисних матеріалів і способів з урахуванням цих вимог;

7) впровадження розроблених матеріалів і способів захисту;

8) розробка рекомендацій із захисту від електрокорозії бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій водопропускних труб і мостів при їх капітальному ремонті й посиленні;

9) розробка пропозицій із вдосконалення нормативних документів, у т. ч. галузевих, із захисту від електрокорозії мостів, водопропускних труб, тунелів та інших споруд.

**Об'єкт дослідження** – обводнені бетонні, залізобетонні та кам'яні конструкції, які експлуатуються на електрифікованих постійним струмом ділянках залізниць і руйнуються.

**Предмет дослідження** – процеси, явища та взаємодії у бетоні в лабораторних і експлуатаційних умовах, у т. ч. при обводнюванні та в електричному полі.

**Методи дослідження.** Фізико-механічні властивості бетону визначались за стандартними методиками. Фазовий склад цементного каменю у бетоні (контрольному і тому, що піддався впливу електричного поля) – за допомогою фізико-хімічних методів:

диференційно-термічного, рентгенографічного (РГ) й інфрачервої спектроскопії (ІЧС). Мікро- і субмікроструктуру цементного каменю та бетонних зразків вивчали методом люмінесцентної дефектоскопії, оптичної й електронної мікроскопії; структурні елементи надмолекулярного рівня – додатковим збільшенням за допомогою сканера та ПЕОМ. Хімічний склад води в чарунках з оброблюваними бетонними зразками – методом *pH*- метрії та методом титрування. Електричні характеристики бетону при впливі постійного електричного поля – за оригінальними методиками, застосовуючи спеціально розроблені і виготовлені датчики і установки. Для обробки експериментальних даних використовували математичні методи.

**Достовірність результатів дослідження** забезпечена використанням у теоретичних дослідженнях фундаментальних положень і закономірностей колоїдної хімії, фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів, застосуванням в експериментах комплексу стандартних та оригінальних фізико-механічних, фізико-хімічних й електрометричних методів досліджень, методів статистичної обробки результатів досліджень, а також підтвердженням даних теоретичних та експериментальних досліджень результатами експлуатаційних досліджень і впровадження.

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

1. Розроблені критерії оцінки електрокорозійного стану бетонних, залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в умовах обводнювання на електрифікованих постійним струмом ділянках колії.

2. Уточнені рівняння міцності цементного каменю з урахуванням зменшення кількості електрогетерогенних контактів, що визначають його міцність, і виникнення електрогомогенних контактів, що обумовлюють появу внутрішніх розтягувальних напруг при електрокорозійному розчиненні портландиту.

3. Установлений механізм і розроблені фізико-математичні моделі дії зовнішнього електричного поля на фазовий склад цементного каменю, міцність і безнапірну водопроникність бетону.

4. Уточнений механізм розчинення портландиту в цементному камені бетону та винесення продуктів розчинення під впливом пульсуючого односпрямованого постійного електричного поля; розроблені рівняння стаціонарного потоку під дією електроміграційних сил та сил в'язкісного тертя і рівняння рівності електроміграційного тиску й капілярного тиску.

5. Уперше розроблені схеми протікання струмів витoku та винесення продуктів гідратації у воду, з якою контактує бетон, розроблена схема протікання струму витoku з рейок у конструкції споруд.

6. Розглянуто приклад прогнозування довговічності бетону в конкретних умовах експлуатації при електрокорозії.

**Практичне значення отриманих результатів.** Теоретичне обґрунтування і розробка фізико-математичних моделей електрокорозії та зміна в часі властивостей матеріалів і конструкцій від неї дозволять у складі обстежень мостів, тунелів та інших залізничних споруд прогнозувати їхню фактичну довговічність.

Ці уявлення використані для проведення коректної оцінки електрокорозійного стану бетону в конструкції та самої конструкції, виділення властивостей бетону, що визначають його електрокорозійну стійкість, і розробки цементно-водних суспензій і бетонів з покращеною електрокорозійною стійкістю в складних умовах експлуатації.

Практичними результатами виконаних досліджень є рекомендації із застосування нових високоефективних недефіцитних і недорогих матеріалів та досить простих технологій захисту й відновлення конструкцій будинків і споруд залізничного транспорту в складних умовах експлуатації, які були використані при виконанні робіт у рамках планів науково-дослідних та опитно-конструкторських робіт Укрзалізниці, Південної залізниці й інших підприємств за темами: «Капітальний ремонт водопропускної труби на 111 км дільниці Харків - Куп'янськ»; «Капітальний ремонт верхньої частини водопропускної труби на 365 км дільниці Основа – Букине»; «Капітальний ремонт водопропускної труби на 19 км дільниці Харків - Люботин».

З урахуванням результатів досліджень по дисертації: розроблені (у співавторстві) і затверджені нормативні документи «Склади захисні кольорові ЗС-1М і ЗС-3М. Технічні умови»; розроблені пропозиції із доповнень до розділу «Особенности защиты железобетонных конструкций от электрокоррозии» у СНиП 2.03.11-85, що передбачають захист бетону та розчину в обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкціях від електрокорозії; підготовлені до видання і затвердження «Технічні вказівки до захисту конструкцій мостів від корозії, що виникає від блукаючих струмів»; розроблені «Технічні вказівки з контролю електричного опору бетону залізобетонних шпал у заводських та експлуатаційних умовах», «Рекомендації по захисту конструктивних елементів будівель та

споруд, що експлуатуються, від агресивних дій», «Рекомендації із захисту та підсилення будівель та споруд станційних комплексів, що руйнуються від спільної дії електричного струму, вібрації, ґрунтових вод» і т.д.

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення і результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно, а також у спільних теоретичних і практичних роботах.

Огляд існуючих уявлень за досліджуваними питаннями, формулювання наукової гіпотези, висновок залежностей, розрахунки і т.д. виконані автором особисто. Виконані особисто також фізико-хімічні дослідження, розроблені уявлення про основні елементарні процеси механізму електрокорозійного руйнування цементного каменю та бетону; методика визначення електрокорозійного стану та ознак електрокорозії бетону.

У співавторстві виведені рівняння стаціонарного потоку та рівності тиску; виконані експлуатаційні та фізико-механічні дослідження, впровадження результатів досліджень.

Участь автора в спільних публікаціях відображена в переліку опублікованих робіт.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи повідомлені на 65-72 Міжнародних науково-технічних конференціях Української державної академії залізничного транспорту й фахівців залізничного транспорту та підприємств (2003-10 рр.), а також на міжнародних семінарах і конференціях: 45-му Міжнародному семінарі з моделювання й оптимізації композитів МОК'45, м. Одеса, 28-29 квітня 2006 р.; VIII науково-технічній конференції "Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa", м. Ольштин, Польща, 18-20 травня 2006 р.; 6-му Українському міжгалузевому семінарі "Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення", м. Київ, 26-28 червня 2006 р.; 2-й науково-технічній конференції "Математичні моделі процесів у будівництві (Залізобетонні конструкції та матеріали)", м. Луганськ, 29-30 березня 2007 р.; Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення", м. Київ, 21-23 червня 2007 р.; 17 Міжнародній конференції з будівельних матеріалів "17 Ibausil", 23-26 вересня 2009 р., м. Веймар, Німеччина.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 16 статей, 10 з них – у виданнях, рекомендованих ВАК України, отримано один патент України на винахід.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, містить 114 рисунків, 7 таблиць, список літературних джерел із 169 найменувань на 17 сторінках, 7 додатків на 14 сторінках. Рисунки та таблиці, які розміщені на окремих сторінках дисертації, займають 49 сторінок. Основний обсяг дисертації становить 178 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані ціль, завдання досліджень, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Відображені основні наукові положення і результати досліджень, які виносяться на захист.

**У першому розділі** виконано аналітичний огляд та аналіз існуючих теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на виявлення механізмів впливу блукаючих струмів і струмів витоку на залізобетонні конструкції, вплив корозії арматури на структуру та властивості бетону навколо арматури, проаналізовані існуючі уявлення про небезпеку та захист залізобетону в умовах електричних впливів та інш.

Існуючі теоретичні уявлення про електрокорозійний процес ґрунтуються на гіпотезі, висловленій ще на початку ХХ ст.: електрокорозія залізобетону – це процес корозії арматури при електричних впливах з подальшим руйнуванням бетону за рахунок тиску продуктів розчину металу. Для забезпечення довговічності бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій у складних умовах експлуатації (постійний струм витоку, обводнення) ці уявлення не прийнятні, тому що не розкривають дійсний механізм електрокорозійного руйнування.

Небезпечні для конструкцій блукаючі струми з'являються через витік струму з рейок, електрифікованих постійним струмом залізниць, чи інших джерел – пристроїв та обладнання на промислових підприємствах, де використовується постійний струм. Блукаючі струми та струми витоку потрапляють на залізобетонні, бетонні, цегельні та кам'яні конструкції мостів, водопропускних труб, тунелів та інших споруд і при сполученні їх з обводненням призводять до електрокорозії не тільки арматури, але і бетону.

Критичний аналіз існуючих експериментальних і теоретичних досліджень виконано за найбільш відомими роботами в області довговічності залізобетону, у т. ч. таких вчених, як С.М. Алексєєв,

В.І. Бабушкін, Ф.М. Іванов, В.А. Кінд, В.М. Москвін, О.П. Мчедлов-Петросян, І.В. Стрижевський та його школа, В.С. Артамонов, Г.А. Вакуленко, Т.Г. Кравченко, І.А. Корнфельд, А.В. Котельников, Ю.І. Міхельсон, В.А. Притула, Е.П. Селедцов, А.П. Сивцов, В.М. Слукін, В.П. Фішман, О.О. Старосельський, А.М. Пługін, А.А. Пługін, А.Є. Арчембелт, А.А. Кнудсон, В. Мак.Колум, І.Дж. Ніколас, Г. Моле, Г.М. Мегі, Е.В. Роза та ін. При цьому проаналізовані дані про електрокорозійну небезпеку й захищеність залізобетону в умовах електричних впливів, уявлення про механізми корозії та електрокорозії залізобетонних конструкцій та ін.

Виконаний аналіз показав неузгодженість між різними спостереженнями, а також різними експериментальними даними про характер і ступінь електрокорозії цементного каменю і бетону. Це обумовлено поляризацією бетону, яка знижує результуючу напругу електричного струму, різним ступенем обводненості конструкцій та зразків, різкою відмінністю постійного струму, застосовуваного у експериментах від дійсного – пульсуючого односпрямованого, що діє на реальні конструкції.

**У другому розділі** надані характеристики основних вихідних матеріалів, наведені стандартні, удосконалені і нові методики.

У дослідженнях застосовувались стандартні будівельні матеріали: портландцемент ПЦ І-500 та ПЦ ІІ/А-Ш-400 ДСТУ Б В.2.7-46; пісок кварцовий (модуль крупності 1,1-1,2); щебінь гранітний; вода питна водопровідна. Для виготовлення електродів застосовувалась сталь Ст3 листова  $\delta=2$  мм. Гідроізоляція поверхні випробуваних зразків досягалась застосуванням захисного складу ЗС-3.

Досліджувались властивості бетонних зразків-кубів, які піддавались впливу пульсуючого односпрямованого струму у лабораторних установках, та зразків-кернах, відібраних з конструкцій, що експлуатуються.

Фізико-механічні та фільтраційні властивості матеріалів визначали за допомогою стандартних методик, прийнятих у державних стандартах, а також оригінальних методик.

При дослідженні впливу електричного струму на бетон для оцінки винесення із зразків продуктів корозії під дією напруги досліджували зміни у часі складу води робочої ємності методом титрування та за допомогою *pH*-метра. З метою визначення складу та властивостей цементного каменю виконували фізико-хімічні дослідження зразків бетону у складі аналізу інфрачервоних спектрів поглинення (ІЧ-Фур'є спектрометр ALPHA) та рентгенофазового аналізу (дифрактометр



ДРОН-3). Структуру зразків вивчали на різних рівнях методами люмінесцентної дефектоскопії та оптичної мікроскопії. Для обробки експериментальних даних використовували математичні методи обробки результатів.

**Третій розділ** присвячений розвитку теоретичних уявлень про процеси виникнення і поширення струмів витоку та механізм електрокорозійного руйнування бетону.

При русі електропоїзда перед електролокомотивом на рейковій колії виникають ділянки з позитивними потенціалами, які є електрокорозійно небезпечними для металевих, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Струм з'являється при входженні поїзда з електротягою у зону знаходження споруди та зникає при виході з неї, тобто струм по суті є пульсуючим односпрямованим.

Опір бетонної чи залізобетонної конструкції на ділянці проходження струму витоку визначається як активною провідністю, так і ємністю, обумовленою поляризацією бетону. Із збільшенням часу  $t$  дії електричного поля збільшуються поляризаційні струм  $I_{ПОЛ}$  та напруга  $U_{ПОЛ}$ . Відповідно результуючі струм і напруга зменшуються:

$$I = I_{НАЧ} - U \cdot C_{МАХ} \frac{t_X}{t}, \quad (1)$$

$$U = U_{НАЧ} - C_{МАХ} \cdot \frac{t_X}{t} \cdot \Delta Q \frac{t_X}{t} = U_{НАЧ} - C_{МАХ} \cdot \Delta Q_{МАХ} \left( \frac{t_X}{t} \right)^2. \quad (2)$$

Поляризація бетону та накопичення ємності  $C$  пов'язано з кількістю  $\Delta Q$  катіонів  $Ca^{2+}$ , електроміграційно переміщених з капілярів бетону при прикладенні зовнішнього електричного поля, що призводить до виникнення електричного протиполя у бетоні.

Для аналізу механізму електрокорозійного руйнування вдосконалена кількісна теорія міцності цементного каменю та бетону, заснована на уявленнях про активні центри на поверхні структуроутворюючих елементів та утворенні між ними електрогетерогенних контактів (ЕГК). Елементарні контакти між потенціалвизначними іонами (ПВІ) у звичайному портландцементному камені будуть здійснюватись крізь один моношар води (рис. 1). В умовах високої концентрації електроліту чи при незначному вмісті води у дисперсній системі виникає концентраційна коагуляція, при якій можливо виникнення елементарних електрогомогенних контактів (ЕГомК) з одним спільним шаром гідратованих протіонів (ПРІ) (рис. 2).

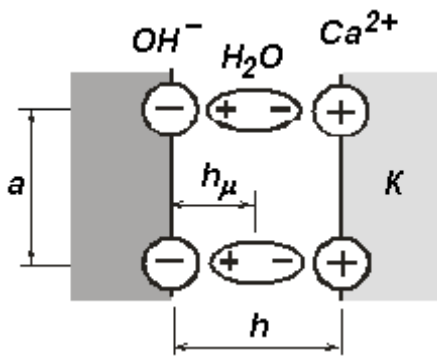


Рис. 1. Схема ЕГК між структурними елементами у цементному камені:  
Ц, К, Г – відповідно цементні, кристалогідратні та гелеві частки

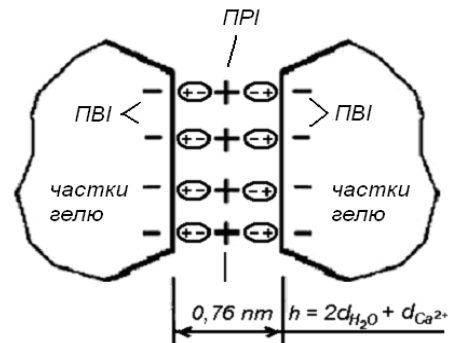


Рис. 2. Схема ЕГомК між однойменно-зарядженими (негативно) гелевими частками з одним загальним шаром гідратованих протионів ПРІ

Початковий вираз для міцності при розтягуванні елементарного ЕГК  $R_{ЕЛ.Р}^{ЕГК}$  у цементному камені має вигляд

$$R_{ЕЛ.Р}^{ЕГК} = \left( \frac{\varepsilon_1 z^- \cdot 2e \cdot \psi_{ЕП}^P}{4\pi \cdot \varepsilon_{ПВІ} \cdot h^2 d_1} + \sum \frac{\mu_B \cdot \psi_{ЕП}^P}{2\pi \cdot \varepsilon_\mu \cdot d_1 \cdot h_\mu^3} \right) \cdot \gamma_{ЕГК} \quad (3)$$

У цементному камені ЕГК не є суцільними. На негативно заряджених силікатних поверхнях часток цементу чи заповнювачів рівноважні позитивно заряджені частки кристалогідратів  $Ca(OH)_2$  адагулювали та не могли зростатися через відштовхування між ними. Негативно заряджені гелеві частки не можуть повністю злипатися через відштовхування однойменних поверхневих зарядів (рис. 3).

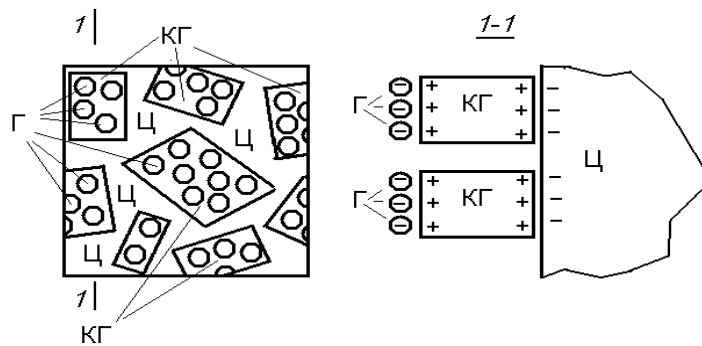


Рис. 3. Ділянка поверхні цементної частки Ц, що покрита частками кристалогідратів КГ, на яких розмістилися частки гелю Г

Частка поверхні розриву, що займають частки цементу, дорівнює

$$\gamma_{\text{Ц}} = \frac{\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}}}{\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}} + B} = \frac{\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{Ц}}}}{\frac{B}{\rho_{\text{Ц}}} \left( \frac{\text{Ц}}{B} + \rho_{\text{Ц}} \right)} = \frac{\frac{\text{Ц}}{B}}{\left( \frac{\text{Ц}}{B} + \rho_{\text{Ц}} \right)}. \quad (4)$$

Частка поверхні розриву цементного каменю, що покрита частками кристалогідратів (частка площі контактів типу Ц-КГ на поверхні розриву цементного каменю) дорівнює  $\gamma^{\text{КГ}} = \gamma^{\text{Ц}} \cdot \alpha \cdot A / \rho^{\text{КГ}}$ , або

$$\gamma^{\text{КГ}} = \frac{\frac{\text{Ц}}{B} \cdot \alpha A}{\rho^{\text{КГ}} \cdot \left( \frac{\text{Ц}}{B} + \rho_{\text{Ц}} \right)}, \quad (5)$$

де  $A$  – масова частка кристалогідратів у продуктах гідратації цементу.

Гель цементного каменю зв'язує практично всю воду, тому частка площі на поверхні розриву цементного каменю, що зайнята частками гелю, дорівнює

$$\gamma^{\text{Г}} = \frac{\text{Ц} \cdot \alpha \cdot B}{\rho^{\text{Г}} \cdot (B - B_{\text{ХЗ}})} = \frac{\text{Ц} \cdot \alpha \cdot B}{\rho^{\text{Г}} \cdot B \left( 1 - \frac{B_{\text{ХЗ}}}{B} \right)} = \frac{\frac{\text{Ц}}{B} \cdot \alpha \cdot B}{\rho^{\text{Г}} \cdot \left( 1 - \frac{\alpha \cdot \frac{B_{\text{ХЗ}}}{B}}{\frac{\text{Ц}}{B}} \right)}, \quad (6)$$

де  $B$  – масова частка гелю у складі продуктів гідратації цементу.

Величини  $A$  та  $B$  визначаються за стехіометричними співвідношеннями кристалогідратів та гелю у хімічних реакціях гідратації  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  та гіпсу.

Вираз для міцності цементного каменю на розтягнення має такий вигляд:

$$R_{P}^{ЦК} = R_{EЛ.P}^{ЕГК} \cdot \gamma^{КГ} \cdot \gamma^{\Gamma} = R_{EЛ.P}^{ЕГК} \cdot \frac{A \cdot B}{\rho^{КГ} \cdot \rho^{\Gamma}} \cdot \alpha^2 \frac{\left(\frac{Ц}{B}\right)^2}{\left(\frac{Ц}{B} + \rho_{Ц}\right) \cdot \left(1 - \alpha \cdot \frac{\frac{B_{ХЗ}}{Ц}}{\frac{Ц}{B}}\right)}. \quad (7)$$

При електрокорозії розчиняється частина кристалогідратів, що мають позитивний електроповерхневий потенціал, та збільшується частка низькоосновних гідросилікатів кальцію, частки яких мають негативний електроповерхневий потенціал  $\psi_{ЕП}^-$ . З урахуванням цього концентрація ЕГК зменшиться

$$\gamma^{ЕГК} = (1 - A^{ЕК}) \cdot \gamma^{КГ}, \quad (8)$$

де  $A^{ЕК}$  – частка кристалогідратів, які розчинились за рахунок електрокорозії.

За рахунок того, що у ЕГК зникають частки кристалогідратів портландиту, а частки гелю зберігаються, між ними виникають ЕГомК, що відштовхуються, частка яких складає

$$\gamma^{ЕГомК} = A^{ЕК} \cdot \gamma^{КГ}. \quad (9)$$

Замість кристалогідратів, що розчинились, звільнений об'єм займає вода, це супроводжується збільшенням товщини плівки води на частках гідросилікатів кальцію до  $\delta^{\Gamma}$  (рис. 4).

Міцність цементного каменю при електрокорозії визначиться виразом

$$R_{ЦК}^{ЕК} = 14(1 - A^{ЕК}) - 20,5 \cdot A^{ЕК} = 14 \left[ 1 - \left( \frac{34,5}{14} A^{ЕК} \right) \right] = 14(1 - 2,46 A^{ЕК}) \quad (10)$$

Відносна міцність цементного каменю у відсотках, при електрокорозії може бути визначена як відношення міцності цементного каменю при електрокорозії до міцності початкового цементного каменю  $R_{ЦК}^{ЕК} / R_{ЦК} \cdot 100$ .

Міцність цементного каменю лінійно зменшується із збільшенням  $A^{ЕК}$  (рис. 5). При розчиненні 42 % кристалогідратів ( $A^{ЕК}=0,4$ ) сила відштовхування між структурними елементами долає силу притягання,

ЕГК в електрогетерогенному просторовому каркасі починають разом з ЕГомК в об'ємному гелі розтягуватись, а цементний камінь розпушуватися.

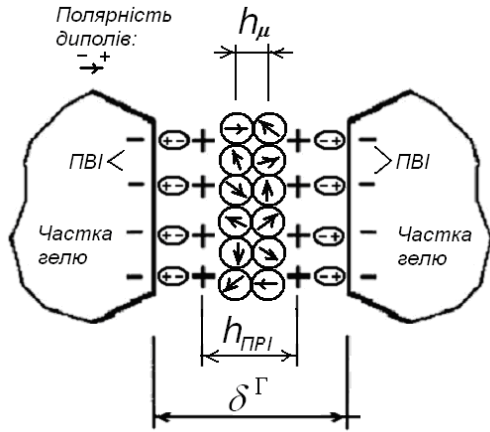


Рис. 4. Схема утворення ЕГомК в об'ємному гелі. Молекули води між шарами ПРІ  $Ca^{2+}$  розташовані хаотично

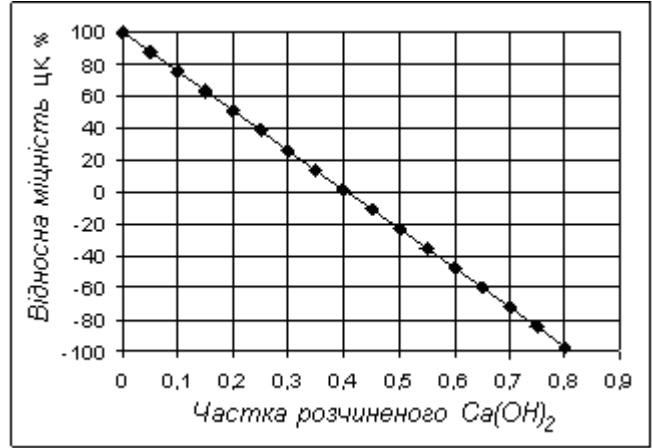


Рис. 5. Залежність відносної міцності цементного каменю від частки кристалогідратів портландиту  $A^{EK}$ , який розчинився від електрокорозії

Розчинення кристалогідратів відбувається під дією сил латерального електроповерхневого відштовхування ПВІ у подвійному електричному шарі (ПЕШ) при зменшенні  $pH$  (рис. 6). Вираз для сили латерального електроповерхневого відштовхування між ПВІ блока кристалогідрату має вигляд

$$\sigma_{ЛАТ}^{EP} = \frac{\epsilon \epsilon_0 (\psi_{EP}^0)^2 b}{4\delta_0^2} \quad (11)$$

Протидійним латеральному електроповерхневому відштовхуванню  $\sigma_{ЛАТ}^{EP}$  є поверхневий натяг  $\sigma$ , Дж/м<sup>2</sup>, що виміряний експериментально та є довідковою величиною для багатьох речовин.

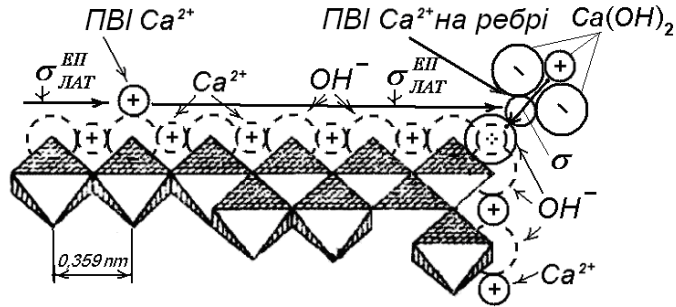


Рис. 6. Схема розташування ПВІ  $Ca^{2+}$  на поверхні та ребрі блока  $Ca(OH)_2$

При зменшенні  $pH$  за рахунок попадання води всередину цементного каменю величина  $\sigma_{ЛАТ}^{ЕП}$  збільшується з 2,1 Н/м (при  $pH=13$ ) до 7,1 Н/м (при  $pH=7$ ). Кутові та реберні ПВІ відриваються від решітки, зміщаючись у прошарок розчину між блоками, захоплюючи за собою два іони  $OH^-$ , пара  $Ca-2OH$  у розчині одразу дисоціює. Збільшення концентрації ПВІ  $OH^-$  призводить до дифузного переміщення надлишкових іонів  $OH^-$  з краю ПЕШ між частками. За таким механізмом продовжується розчинення блоків кристалогідратів, за рахунок чого зменшується розмір  $b$  блока та  $\sigma_{ЛАТ}^{ЕП}$  за рівнянням (11) до установлення нового рівноважного стану блока при  $\sigma_{ЛАТ}^{ЕП} = \sigma$ .

При вилужуванні катіони  $Ca^{2+}$  переходять у прошарок між блоками кристалогідратів та з прошарку за всіма напрямками простору рівномірно (рис. 7). При виникненні електричного поля струмів витoku напруженістю  $E_0$  з'являється їх спрямоване електроміграційне перенесення (рис. 8). Вилужування за рахунок зменшення  $pH$  на границі бетону з водою буде проходити у поверхневих капілярах, поступово поглиблюючись в об'єм бетону, а при електрокорозії – по всьому об'єму бетону рівномірно та більш інтенсивно.

При дії струмів витoku на конструкції виникає електроміграційне перенесення іонів та продуктів розчинення цементного каменю крізь бетон. Електроміграційна сила, що діє на катіони  $Ca^{2+}$  рухливої частини ПЕШ, при виникненні зовнішнього електричного поля з напруженістю  $E$  дорівнює

$$F_{ел} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \psi \cdot r_{кан} l_{кан}}{2d_1} \cdot E \quad (12)$$

Електроміграційному перенесенню гідратованих іонів протидіє

сила в'язкого опору води

$$F_{mp} = \eta \cdot 2\pi \cdot r_{кан} l_{кан} \cdot \frac{v}{\delta_{mp}}, \quad (13)$$

де  $\eta$  – в'язкість води, Па·с;  $v/\delta_{mp}$  – градієнт лінійної швидкості, м/с.

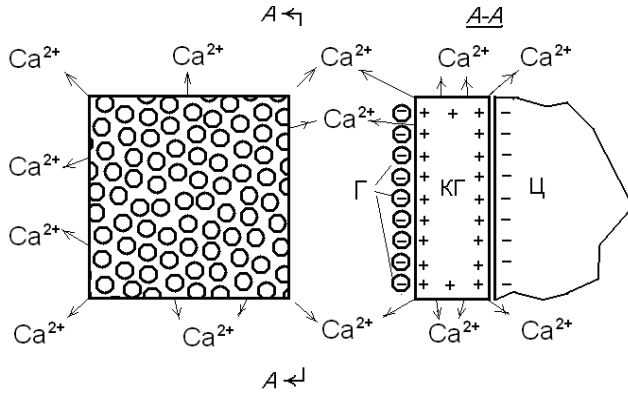


Рис. 7. Схема виходу ПВІ  $Ca^{2+}$  з кутів та ребер кристалогідратів портландиту у прошарок розчину між блоками кристалогідратів цементного каменю при зниженні  $pH$  розчину у ньому:

Ц – фрагмент частки цементу;  
КГ – шар кристалогідратів;  
Г - шар гелевих часток

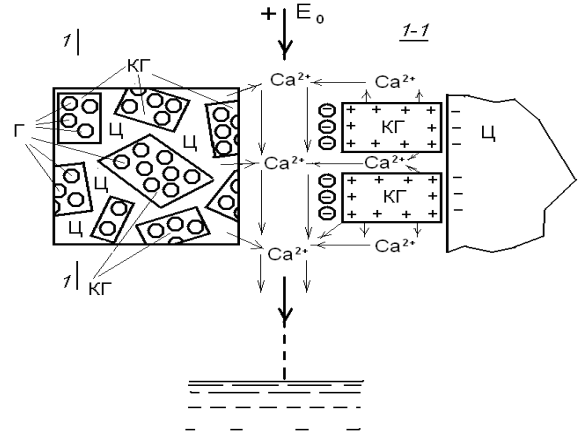


Рис. 8. Шляхи виходу ПВІ  $Ca^{2+}$  з прошарку між блоками кристалогідратів у капіляри цементного каменю та воду при зниженні  $pH$  розчину у ньому під впливом потенціалу струмів витoku  $E_0$

При  $F_{эл} = F_{mp}$  встановлюється стаціонарний потік

$$\frac{\varepsilon\varepsilon_0\psi r_{кан} l_{кан}}{2d_1} \cdot E = \eta \cdot 2\pi r_{кан} l_{кан} \cdot \frac{v}{\delta_{mp}}, \quad (14)$$

з якого визначається лінійна швидкість потоку

$$v = \frac{E \cdot \varepsilon\varepsilon_0\psi \cdot r_{кан} l_{кан} \delta_{mp}}{2d_1 \cdot \eta \cdot 2\pi r_{кан} l_{кан}} = \frac{E \cdot \varepsilon\varepsilon_0\psi \cdot \delta_{mp}}{4\pi d_1 \eta}. \quad (15)$$

З урахуванням цього рівняння виведено також вираз для часу, за який будуть винесені іони із пор та капілярів бетону за межі захисного шару.

У четвертому розділі приведені результати експериментальних досліджень, спрямованих на перевірку основних теоретичних

положень. Приведені результати оцінки впливу зовнішнього електричного поля та електрокорозійного руйнування цементного каменю і бетону в бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкціях у складних умовах експлуатації.

Розроблена методика визначення ознак електрокорозії бетону у бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкціях у складних умовах експлуатації, заснована на особливостях струму та процесах у бетоні у колі «рейка – бетон конструкції – земля».

При візуальному обстеженні були виділені характерні риси пошкодження бетонів конструкцій у результаті дії струмів витоку. Проведені фізико-хімічні дослідження зразків цементного каменю, бетону, розчину бутової кладки та швів кам'яного облицювання, що свідчать про сильне корозійне руйнування, вилужування та карбонатизацію матеріалу за роки експлуатації. Виконано визначення ступеня електрокорозії бетону від струму витоку за різницею електричних потенціалів у бетоні.

Струм витоку з рейки у землю проходить крізь бетонну конструкцію, у результаті чого на її поверхні виникає електричний потенціал позитивного знака відповідної величини, який зменшується від зовнішньої поверхні до внутрішньої (рис. 9).

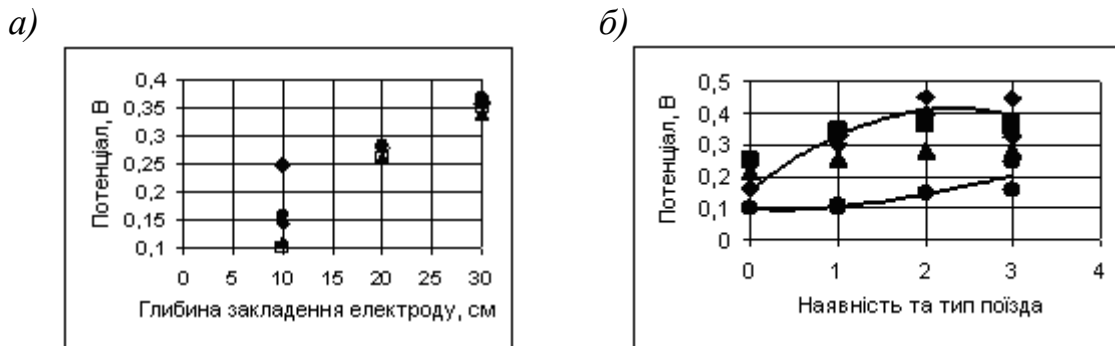


Рис. 9. Потенціали на різній глибині бетонної конструкції (а) залежно від наявності та типу поїздів (б):

0, 1, 2 и 3 – відповідно відсутність поїзда, електропоїзд, пасажирський та вантажний поїзд; нижня крива – на внутрішній поверхні бетонної стіни, верхня – на глибині бетону 30 см

Наведені результати експериментальних досліджень бетонів конструкцій пасажирської платформи, що експлуатується на електрифікованій постійним струмом ділянці колії. Аналіз результатів



вимірів потенціалів на рейках та конструкціях платформи дозволив надати схему розповсюдження струму витоку (рис. 10).

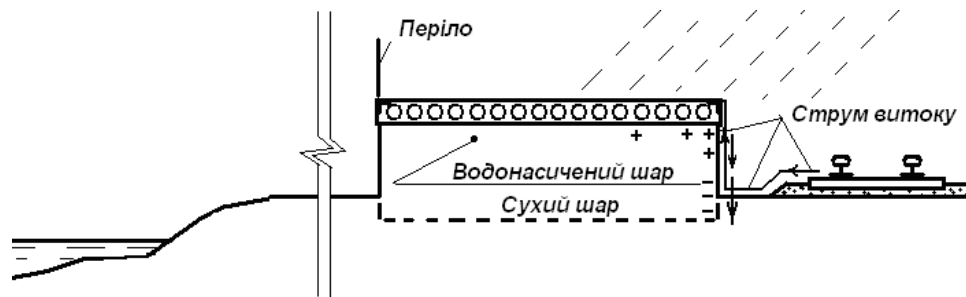


Рис. 10. Схема протікання струму витоку з рейок у річку (земля)

За даними цих досліджень встановлено, що при проходженні поїзда з електротягінням по станційній колії у перші хвилини бетонний блок та плита поляризуються, при цьому катіони  $Ca^{2+}$  у капілярах бетону зміщаються у напрямку верхньої частини торця блока та плити. У результаті потенціал у нижній частині блока стає більш негативним. З часом зростає кількість катіонів  $Ca^{2+}$  та гідратованої ними води, винесених електроосмотичним потоком, і потенціал у бетоні верхньої частини блока та плити із боку рейок стає негативним, а у нижній частині – позитивним. По суті це являє собою вилузування  $Ca(OH)_2$  з бетону під впливом струмів витоку, тобто електрокорозію бетону.

Виконані експлуатаційні дослідження механізму руйнування бетону та розчину у залізобетонних, бетонних і кам'яних конструкціях, що експлуатуються в умовах обводнення та постійного струму витоку від транспорту з електротягою, який рухається, підтвердили реальність сильної електрокорозії бетону, яка значно скорочує строк служби цих конструкцій та приводить їх у аварійне становище.

Для перевірки теоретичних досліджень проведені лабораторні дослідження. Були виготовлені бетонні зразки-куби ( $10 \times 10 \times 10$  см), до них прикріплені металічні електроди. Зразки виділені у серії: основна; К№1 (зразок обробляється тільки проточною водою); К№2 (зразок знаходиться у стоячій воді). На основний зразок крізь електроди подавалася напруга 40 В по автоматичному режиму: пропуск струму – 10 хв, витримування без струму – 7 хв ( $10+7$  – цикл), що приблизно відповідно інтервалам проходження поїздів з електротягою та встановленому режиму попадання струму витоку на конструкції.

Реєструвалися електричні характеристики: показання струму, напруги, що подається, та остаточної різниці потенціалів на

електродах. На основі даних вимірювань початкового (перед черговим циклом обробки) та кінцевого (зараз же після обробки) значення струму (рис. 11) розрахована маса та кількість заряду  $Ca(OH)_2$ , винесеного з досліджуваного зразка

$$m = \frac{Q \cdot M}{F}, \quad (16)$$

де  $Q$  – винесений із зразка заряд катіонів  $Ca^{2+}$ , Кл;  $M$  – молекулярна маса  $Ca(OH)_2$ , 74 г/моль;  $F$  – число Фарадея,  $9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль.

При вимірах на бетонних зразках у кожному циклі було зафіксовано так звану остаточну напругу (рис. 12), що обумовлена поляризацією бетону, яка поступово спадає після вимикання напруги.

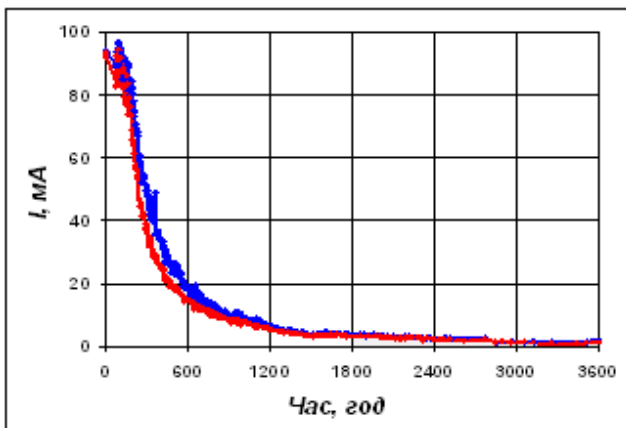


Рис. 11. Сила струму  $I$  у зразку бетону на початку (верхня крива) та у кінці (нижня крива) кожного циклу при тривалому впливі пульсуючої односпрямованої постійної напруги

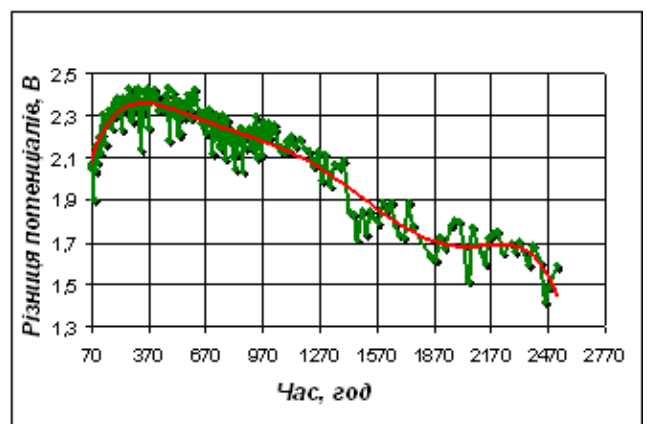


Рис. 12. Залишкова (визвана) напруга між поверхнями бетонного зразка

Результати теоретичного розрахунку величини результуючого струму, що зменшується за рахунок поляризації, зіставлені з експериментальними даними (рис. 13). Високий ступінь збігу розрахункової кривої з експериментальними даними за характером зміни та абсолютними величинами струму свідчить про правильність уявлень щодо поляризації обводненого бетону протягом достатньо короткого часу (до 4 хв) під впливом електричного поля.

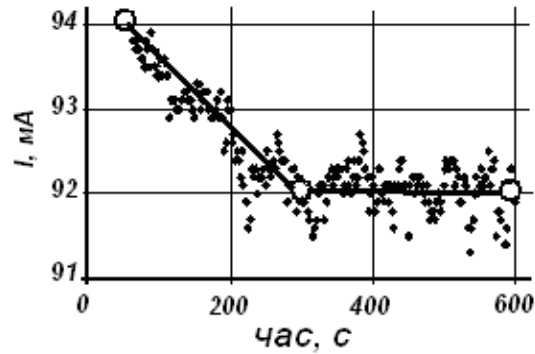


Рис. 13. Розрахункова крива експериментальних даних зміни струму за один цикл обробки бетонного зразка електричним полем напругою  $U = 40 \text{ В}$ :

—○— - розрахункова крива; ◆◆◆ - експериментальні дані

Після закінчення обробки пульсуючою односпрямованою напругою зразки були випробувані на міцність при стисненні. Отримані дані свідчать про суттєве зменшення міцності бетонного зразка (основний) у зоні контакту з потоком води, який знаходиться під впливом пульсуючої односпрямованої напруги  $U = 40 \text{ В}$  протягом 104 діб.

Проведені дослідження за допомогою методів РГ, ИКС, оптичної мікроскопії та люмінесцентної дефектоскопії підтвердили, що проточна вода та пульсуючий односпрямований струм викликає сильне вилужування цементного каменю у бетоні, особливо при їх спільній дії. При цьому проточна вода призводить до вилужування у поверхневому шарі бетону, а пульсуючий односпрямований струм – до глибинного вилужування по всій товщині бетону (конструкції).

Перевірку реальності розчинення та винесення продуктів гідратації цементу з бетонного зразка у воду під дією постійної напруги виконали фіксуючи  $pH$  води. При подачі напруги  $pH$  води зростав з  $pH$  7,86 до  $pH$  8,63 ( $\Delta pH = 0,77$ ). Припущення про винесення в оточуючу бетон воду іонів  $Ca^{2+}$  під дією електричного поля підтвердилися також за допомогою методу визначення загальної жорсткості шляхом хімічного титрування води трилоном Б до та після обробки.

Експериментальні дослідження та висновки з них підтвердили коректність розроблених уявлень о механізмі електрокорозії бетону у бетонних та залізобетонних конструкціях, що експлуатуються на ділянках колії, електрифікованих на постійному струмі в обводнених умовах.

У п'ятому розділі на основі проведених експериментальних досліджень розроблені пропозиції по вдосконаленню нормативних документів по захисту від електрокорозії бетонних та залізобетонних конструкцій що проектуються. Результати досліджень використані при розробці та впровадженні нових матеріалів та технологій для захисту від електрокорозії, відновленні та посиленні аварійних конструкцій та споруд (водопропускних труб, мостових опор). Розроблена автором методика використана при визначенні електрокорозійного стану бетонних конструкцій.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У зв'язку з розширенням електрифікації залізничного транспорту, а також з недосконалістю, точніше відсутністю, уявлень про електрокорозію бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій проблема розробки механізму електрокорозії бетону в обводнених конструкціях є актуальною.

2. Неузгодженість уявлень про електрокорозію бетону в залізобетонних конструкціях, недосконалість нормування із захисту від електрокорозії обумовлені у першу чергу поляризацією бетону, яка знижує результуючу напругу електричного струму, та характером напруги струму витoku, діючого на конструкції і який є не постійним, а пульсуючим односпрямованим, що змінюється у такт з проходженням поїзда з електротягою у зоні конструкції.

3. Розроблені уявлення про механізм електрокорозії бетону в бетонних та залізобетонних конструкціях, в основі якого лежать зменшення міцності за рахунок руйнування електрогетерогенних контактів (ЕГК) при розчиненні портландиту та виникненні електрогомогенних контактів (ЕГомК), що визивають тиск відштовхування у цементному камені, а також процеси винесення продуктів розчину з бетону у воду, з якою він контактує, в електричному полі струмів витoku. При цьому уточнені раніше розроблена кількісна теорія міцності цементного каменя та відповідні рівняння міцності, засновані на електрогетерогенних контактах як носіях міцності цементного каменя та бетону.

4. Процес розчинення портландиту розгляден з відповідними схемами та рівняннями як результат дії сил латерального електроповерхневого відштовхування  $\sigma_{\text{ЛАТ}}^{\text{ЕП}}$  потенціалвизначальних іонів  $\text{Ca}^{2+}$  у їх подвійних електричних шарах (ПЕШ) при зменшенні  $pH$ , величина яких перевищує сили, утримуючі пари  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  у кристалічній решітці, та викликає їх відрив на кутах та ребрах портландитових блоків у прошарок між ним з дисоціацією  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  на

іони. Подальший процес винесення іонів здійснюється за рахунок спрямованого електроміграційного переміщення катіонів  $Ca^{2+}$  (у бік від позитивного потенціалу електричного поля) з прошарку розчину між блоками у розчин капілярів цементного каменю, а з нього – у воду, з якою контактує бетон. Виникаючий при їх винесенні мембранний потенціал приводить до винесення слідом за катіонами  $Ca^{2+}$  іонів  $OH^-$ . Виведено рівняння стаціонарного потоку продуктів гідратації, що розчиняються на основі рівності сил електроміграційного тиску та в'язкісного тертя у капілярі  $F_{эл} = F_{тр}$ , рішення якого дозволило вивести вираз часу, за який будуть винесені іони з пор та капілярів бетону за границі захисного шару. Результати розрахунку з цього рівняння співпали з реальними строками служби обводнених конструкцій.

5. Результати експлуатаційних досліджень підтвердили реальність електрокорозії бетону від дії пульсуючого односпрямованого постійного струму витоку. При цьому розроблені схеми протікання струмів витоку та винесення продуктів гідратації у воду, з якою контактує бетон, розроблена схема протікання струму витоку з рейок у конструкції споруд, які можуть бути багатократно використані при оцінці електрокорозійної небезпеки інших споруд, масово розповсюджених на залізницях.

6. Дослідження бетонних зразків  $10 \times 10 \times 10$  см, які тривалий час знаходились у проточній воді під багатократною дією пульсуючого односпрямованого електричного поля напругою  $U = 40$  В, показали характерні зміни струму, що проходить крізь бетонний зразок: від 100 мА з поступовим зменшенням до 5 мА. При вимиканні напруги у бетоні залишалась визвана напруга приблизно 2,5 В, що повільно зменшувалась. Виведено рівняння для визначення часу винесення портландиту залежно від тривалості обробки та величини напруги. Розрахована за цим рівнянням винесена маса  $Ca(OH)_2$  за 50 діб безперервної обробки склала приблизно 52% від створеної у результаті гідратації цементу. Ці дані та зроблені за ними висновки можуть бути основою для прогнозування довговічності бетону у конкретних умовах експлуатації (за обводненістю, потенціалу струму витоку).

7. Експлуатаційні дослідження, результати експериментів, у т.ч. змінені величини  $pH$  розчинів, у яких знаходились оброблювані бетонні зразки, їх комплексні фізико-механічні дослідження, а також фізико-хімічні дослідження проб цементного каменю, відібраних з них, підтвердили коректність розроблених уявлень про її механізм для бетонних та залізобетонних конструкцій, що експлуатуються на

ділянках колії, електрифікованих постійним струмом в обводнених умовах.

8. Практична цінність результатів досліджень з дисертації полягає у такому: розроблені пропозиції з доповнень до розділу «Особенности защиты железобетонных конструкций от электрокоррозии» в СНиП 2.03.11-85, які забезпечують захист бетону та розчину в обводнених бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкціях від електрокорозії; розроблені методики досліджень реалізовані при відновленні та посиленні аварійних мостів і водопропускних труб за планами капітального ремонту Південної залізниці та ряду інших організацій; розроблено спосіб визначення електрокорозійної стійкості захисних покриттів, на який отримано патент на винахід; запропоновано новий спосіб захисту від електрокорозії бетонних та залізобетонних конструкцій пасажирських платформ, на який подано заявку на отримання патентів на винахід; розроблено (у співавторстві) та затверджено галузеві нормативні документи.

9. Оцінений економічний ефект від впровадження результатів досліджень складає 164,569 тис. грн. Основний економічний ефект від розробок з дисертації полягає у захисті від аварій та руйнувань, підвищенні довговічності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій, що експлуатуються в умовах обводнення і постійних струмів витоку.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Борзяк О. С. Развитие представлений о механизме электрокоррозии бетона в обводненных конструкциях / О. С. Борзяк // Науковий вісник будівництва. - Харків, 2010. - Вип.57. – С. 283-288.

2. Долговечность конструкций и сооружений из бетона, эксплуатируемых в условиях обводнения / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. С. Борзяк [та ін.]. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: (Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення). - Київ, 2006. - №73. - С. 248-253.

*Особистий внесок:* розрахунок дифузійного виносу продуктів корозії у водне середовище.

3. Экспериментальное определение потенциалов в конструкциях железнодорожных мостов на электрифицированных участках пути / А. Н. Плугин, Д. А. Плугин, О. С. Борзяк [та ін.]. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: (Сучасні проблеми проектування, будівництва та

експлуатації споруд на шляхах сполучення). - Київ, 2006. - №73. - С.253-257.

*Особистий внесок:* вимірювання потенціалів на конструкціях металевої ферми (разом з Д. А. Пługінім і І. В. Подтележніковою).

4. Електроміграційний перенос у процесах корозії бетону / [Пługін А. М., Пługін Д. А., Подтележнікова І. В., Борзяк О. С.]. // Зб. наук. праць УкрДАЗТ: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті. - Харків, 2006. - Вип.77. - С. 130-138.

*Особистий внесок:* розрахунок лінійної швидкості потоку електроліту в капілярах цементного каменю.

5. Электроосмотический перенос как фактор разрушения железобетонных и каменных опор железнодорожных мостов на водотоках / А. Н. Пługин, А. А. Пługин, О. С. Борзяк [та ін.]. // Зб. наук. праць ЛНАУ: Серія «Технічні науки»: 2-а наук. техн. конфер. «Математичні моделі процесів в будівництві» (Залізобетонні конструкції та матеріали), 29-30 березня 2007 р. - Луганськ, 2007.- №71(94).- С.189-196.

*Особистий внесок:* застосування рівняння ЕОП для капілярів цементного каменю бутової кладки опори.

6. Зменшення та усунення тріщиноутворення дерев'яних шпал і брусів та поліпшення їх електроізолювальних властивостей / [А. М. Пługін, Д. А. Пługін, О. С. Борзяк, А. А. Пługін] // Дороги і мости: Міжнар. наук.-техн. конфер. «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення», 21-23 червня 2007: Зб. наук. праць. - Київ, 2007. - Т.ІІ, Вип. 7. - С.114-120.

*Особистий внесок:* проведення експериментальних досліджень (разом з Д. А. Пługінім).

7. Механизм электрокоррозии бетонных конструкций пульсирующим однонаправленным блуждающим током или током утечки / А. Н. Пługин, А. А. Пługин, О. С. Борзяк [та ін.]. // Науковий вісник будівництва. - Харків, 2007. - Вип. 42. - С.106-111.

*Особистий внесок:* вимірювання електричних потенціалів на рейкових коліях, поверхні ґрунту та спорудах (разом з О. А. Пługінім і О. А. Дудінім).

8. Пługи А. Н. Повышение эффективности пропитки деревянных шпал каменноугольным маслом за счет введения катионных ПАВ / А. Н. Пługин, Д. А. Пługин, О. С. Борзяк // Зб. наук. праць УкрДАЗТ: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті. - Харків, 2007. - Вип.87. - С. 98-107.

*Особистий внесок:* проведення експериментів та обробка результатів.

9. Дослідження можливості виробництва залізобетонних шпал за безпропарувальною технологією / А. А. Плугін, А. М. Плугін, О. С. Борзяк [та ін.]. // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. - Харків, 2008. - Вип. 91. - С. 211-224.

*Особистий внесок:* проведення фізико-хімічних досліджень.

10. Уточнение количественной теории прочности бетона и закона водоцементного отношения / [А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. С. Борзяк, О. А. Калинин] // Зб. наук. праць УкрДАЗТ: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті. - Харків, 2009. - Вип. 109. - С. 8-37.

*Особистий внесок:* розробка варіантів еквівалентних схем електроодомогеного контакту між однойменно зарядженими структурними елементами в цементному камені.

11. Блуждающие токи на конструкциях, зданиях и сооружениях, расположенных вблизи электрифицированных постоянным током участках железных дорог / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. С. Борзяк [та ін.]. // Зб. наук. праць УкрДАЗТ: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті. - Харків, 2009. - Вип. 109. - С. 131-143.

*Особистий внесок:* проведення експериментальних досліджень електричних потенціалів на рейкових коліях, поверхні ґрунту, будинках і спорудах (разом з О. А. Плугіним та О. А. Дудіним).

12. Емельянова И. А. Анализ зависимости прочностных характеристик строительных смесей от особенности их приготовления в различных видах смесителей / И. А. Емельянова, О. В. Доброходова, О. С. Борзяк // Зб. наук. праць УкрДАЗТ: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті. - Харків, 2009. - Вип. 109. - С. 56-66.

*Особистий внесок:* проведення мікроскопічних досліджень аншліфів зразків бетону й розчину.

13. Исследование влияния токов утечки и блуждающих токов на здания и сооружения, расположенные возле электрифицированных железнодорожных путей / А. Н. Плугин, Ал. А. Плугин, О. С. Борзяк [та ін.]. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». - Харків, 2009. - №40. - С. 88 - 104.

*Особистий внесок:* проведення фізико-хімічних досліджень бетонних зразків.



14. Пат. 88998 UA МПК E04B1/66, E04B1/62. Спосіб визначення електрокорозійної стійкості захисних покриттів / Пługін А. М., Пługін А. А., Подтележнікова І. В., Афанасьєв О. В., Горбачова Ю. М., Мірошніченко С. В., Пługін Д. А., Пługін О. А., Дудін О. А., Борзяк О. С.; заявник та патентовласник Українська держ. академія залізнич. тр-ту - №а200811897 заявл. 07.10.2008; опубл. 10.12.2009, Бюл. №23.

*Особистий внесок:* проведення оптико-мікроскопічних досліджень ділянок поверхні металів при дії різних потенціалів електрокорозійного струму.

15. Проектирование долговечности конструкций и сооружений из бетона на основе физико-химических моделей / А. Н. Пługин, А. А. Пługин, О. С. Борзяк [и др.]. // Компьютерное материаловедение и обеспечение качества: 45-й Междунар. семинар по моделированию и оптимизации композитов МОК'45, 28-29 апреля 2006. - Одеса, 2006. - С. 10 - 14.

*Особистий внесок:* критичний аналіз існуючих методик розрахунків терміну служби залізобетону в агресивних середовищах.

16. Проектирование долговечности конструкций и сооружений из бетона на основе физико-химических моделей / А. Н. Пługин, А. А. Пługин, О. С. Борзяк [та ін.]. // Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa: VIII Konferencje Naukowo-Techniczna, 18-20 maja 2006. - Olsztyn, 2006. - S. 143-152.

*Особистий внесок:* критичний аналіз існуючих методик розрахунків терміну служби залізобетону в агресивних середовищах.

17. Research of influence of leakage currents and stray currents on railways on buildings and constructions / A. N. Plugin, O. Plugin, O. Borzyak [та ін.]. // 17 Internationale Baustofftagung, 23-26 September 2009, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. - Weimar, 2009. - Band 2. - P.1151-1156.

*Особистий внесок:* проведення фізико-хімічних досліджень бетонних зразків.

## АНОТАЦІЯ

Борзяк О.С. Механізм електрокорозії бетону залізобетонних конструкцій в складних умовах експлуатації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 - будівельні матеріали та вироб.-Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2010.

Дисертація присвячена актуальній темі – розробці уявлень про реальний механізм електрокорозії обводненого бетону в залізобетонних конструкціях на електрифікованому постійним струмом транспорті на основі врахування електроповерхневих властивостей, явищ, процесів і взаємодій у бетоні як дисперсній системі та використанню цих уявлень для підвищення довговічності бетонних, кам'яних і залізобетонних конструкцій.

Розроблено уявлення про механізм електрокорозії бетону в бетонних і залізобетонних конструкціях. Розроблено рівняння стаціонарного потоку продуктів гідратації, що розчиняються на основі рівності сил електроміграційного тиску і в'язкісного тертя у капілярі. Встановлено механізм та розроблено фізико-математичні моделі дії зовнішнього електричного поля на фазовий склад цементного каменю, міцність та безнапірну водопроникність бетону.

Розроблені схеми протікання струмів витоку з рейок в конструкції споруд та виносу продуктів гідратації у воду, з якою контактує бетон, які можуть бути використані при оцінці електрокорозійної небезпеки інших споруд, поширених на залізницях.

Результати досліджень використані при розробці та впровадженні нових матеріалів і технологій для захисту від електрокорозії, відновленні та посиленні аварійних конструкцій і споруд. Розроблена в роботі методика використана при визначенні електрокорозійного стану, прогнозуванні фактичної довговічності бетонних конструкцій.

Ключові слова: кам'яні, бетонні та залізобетонні конструкції, обводнення, електрокорозія, струми витоку і блукаючі струми, руйнування, відновлення і захист, діагностування, прогнозування.

## **АННОТАЦІЯ**

Борзяк О.С. Механизм электрокоррозии бетона железобетонных конструкций в сложных условиях эксплуатации.- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 - строительные материалы и изделия.- Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2010.

Диссертация посвящена актуальной теме – разработке представлений о реальном механизме электрокоррозии обводненного бетона в железобетонных конструкциях на электрифицированном постоянным током транспорте с учетом электроповерхностных свойств, явлений, процессов и взаимодействий в бетоне как дисперсной системе и использованию этих представлений для повышения долговечности бетонных, каменных и железобетонных конструкций.

Выполнен аналитический обзор и анализ существующих теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выявление механизмов воздействия блуждающих токов и токов утечки на железобетонные конструкции. Анализ показал, что имеющиеся представления о механизме электрокоррозии железобетонных конструкций в условиях обводнения и токов утечки (сложные условия эксплуатации) не в полной мере соответствуют действительному.

Разработаны представления о механизме электрокоррозии бетона в бетонных и железобетонных конструкциях, в основе которого лежат уменьшение прочности за счет разрушения электрогетерогенных контактов (ЭГК) при растворении портландита и возникновение электрогомогенных контактов (ЭГомК), вызывающих растягивающие напряжения в цементном камне, а также процессы выноса продуктов растворения из бетона в воду, с которой он контактирует, под влиянием электрического поля токов утечки. При этом уточнены ранее разработанная количественная теория прочности цементного камня и соответствующее уравнение прочности, основанные на учете электрогетерогенных контактов как носителях прочности цементного камня и бетона.

Процесс растворения портландита рассмотрен с соответствующими схемами и уравнениями как результат действия сил латерального электроповерхностного отталкивания  $\sigma_{\text{ЛАТ}}^{\text{ЭП}}$  потенциалопределяющих ионов  $\text{Ca}^{2+}$  в их ДЭС при уменьшении  $pH$ , дальнейший процесс выноса осуществляется за счет направленного электромиграционного перемещения катионов  $\text{Ca}^{2+}$ .

Разработано уравнение стационарного потока растворяющихся продуктов гидратации на основе равенства сил электромиграционного давления и вязкостного трения в капилляре, решение которого позволило вывести выражение времени, за которое будут вынесены ионы из пор и капилляров бетона за пределы защитного слоя. Результаты расчета по этому выражению совпали с реальными сроками службы обводненных конструкций.

Представлены результаты комплексных лабораторных исследований, в том числе физико-химических, подтверждающих научную гипотезу о механизме электрокоррозии бетона. Установлен механизм и разработаны физико-математические модели воздействия внешнего электрического поля на фазовый состав цементного камня, прочность и безнапорную водопроницаемость бетона.

Разработаны схемы протекания токов утечки с рельсов в конструкции сооружений и выноса продуктов гидратации в воду, с которой контактирует бетон, которые могут быть использованы при оценке электрокоррозионной опасности других сооружений, распространенных на железных дорогах.

Разработаны предложения по совершенствованию нормативных документов по защите от электрокоррозии проектируемых бетонных и железобетонных конструкций. Результаты исследований использованы при разработке и внедрении новых материалов и технологий для защиты от электрокоррозии, восстановлении и усилении аварийных конструкций и сооружений (водопрпускных труб, мостовых опор). Разработанная в работе методика использована при определении электрокоррозионного состояния бетонных конструкций.

Теоретическое обоснование и разработка физико-математических моделей электрокоррозии и изменения во времени свойств материалов и конструкций от нее позволит в составе обследований мостов, тоннелей и других железнодорожных сооружений прогнозировать их фактическую долговечность.

Ключевые слова: каменные, бетонные и железобетонные конструкции, обводнение, электрокоррозия, токи утечки и блуждающие токи, разрушение, восстановление, диагностика, прогнозирование.

### **ABSTRACT**

Borzyak O.S. The electrocorrosion mechanism of concrete of reinforced concrete structures in severe conditions. – Manuscript.

The thesis for the candidate of technical sciences degree by specialty 05.23.05 – building materials and products. - Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkov, 2010.

The thesis is devoted to the actual topic - the development of notions about the real mechanism of electrocorrosion of a watered concrete in reinforced concrete structures on electrified by the direct current transport based on the concepts of electrosurface properties, phenomena, processes and interactions in disperse systems and using of these ideas to improve the durability of concrete, stony and concrete structures.

The notions of the mechanism of electrocorrosion of concrete in concrete and reinforced concrete structures are developed. The equation of a stationary flow of dissolving hydration products on the basis of an equality of forces of electromigration pressure and viscous friction in a capillary are

developed. The mechanism is developed, physical and mathematical models of the external electric field on a phase composition of cement, strength and a non-pressure water permeability of concrete, are worked out.

The schemes of a flow of a leakage current from rails in constructions of buildings and a carry-over of hydration products into the water, which contacts with the concrete, are worked out. These schemes can be used in assessing of the electrocorrosion risk of an other structures, widespread on railways.

The results of the research are used in the development and introduction of new materials and technologies protecting against electrocorrosion, restore, and a reinforcement of emergency constructions and structures. Developed in the work methodology used in determining of electrocorrosion state the prediction of an actual durability of concrete constructions.

Keywords: stony, concrete, reinforced and concrete constructions, watering, electrocorrosion, leakage currents and stray currents, destruction, recovery and protecting, diagnosis, prognosis.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України.

**Науковий керівник:** Лауреат Державної премії України в галузі науки та техніки, доктор хімічних наук, професор  
**Плугін Аркадій Миколайович,**  
Українська державна академія залізничного транспорту, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кондращенко Олена Володимирівна,**  
Харківська національна академія міського господарства, професор кафедри технології будівельного виробництва та будівельних матеріалів;

кандидат технічних наук, доцент  
**Костюк Тетяна Олександрівна,**  
Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури, доцент кафедри будівельних матеріалів та виробів.

Захист відбудеться 30 вересня 2010 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий 27 серпня 2010 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

кандидат

технічних

наук,

доцент

Ватуля Г.Л.

Борзяк Ольга Сергіївна

**МЕХАНІЗМ ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ БЕТОНУ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
КОНСТРУКЦІЙ В СКЛАДНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

*Відповідальний за випуск*  
Партала Н.М.

---

Підписано до друку \_\_\_\_·\_\_\_\_·\_\_\_\_  
Формат паперу 60x84 1/16 Папір для розмножувальних апаратів.  
Друк офсетний. Умовн.- друк. арк. 0,9.  
Замовл. № \_\_\_\_ . Тираж 100 пр. Безкоштовно.

---

Видавництво УкрДАЗТу. Свідоцтво ДК № 2874 від 12.06.2007 р.  
Типографія УкрДАЗТу: 61050, м. Харків - 50, пл. Фейєрбаха, 7