

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Українська державна академія залізничного транспорту

ДУДІН Олександр Аркадійович

УДК 691.32:620.193.7 (043.3)

**МЕХАНІЗМ ВПЛИВУ ЗМІННОГО СТРУМУ ВИТОКУ  
І ВИСОКОВОЛЬТНОЇ НАПРУГИ НА ОБВОДНЕНІ БЕТОННІ,  
ЗАЛІЗОБЕТОННІ ТА КАМ'ЯНІ СПОРУДИ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

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

Харків 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
Плугін Андрій Аркадійович,  
Українська державна академія  
залізничного транспорту,  
завідувач кафедри будівельних матеріалів,  
конструкцій та споруд

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Зайченко Микола Михайлович,  
Донбаська національна академія  
будівництва та архітектури,  
проректор з навчальної роботи

кандидат технічних наук, доцент,  
Костюк Тетяна Олександрівна,  
Харківський національний університет  
будівництва та архітектури,  
доцент кафедри будівельних матеріалів та виробів

Захист дисертації відбудеться «14» червня 2012 р о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Української державної академії залізничного транспорту за адресою: майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050.

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

Автореферат розісланий «11» травня 2012 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, к.т.н., доц.

Г.Л. Ватуля

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На залізницях України електрифіковані ділянки становлять 41,7% загальної протяжності, з яких 51% електрифіковано змінним струмом. Доля ділянок на змінному струмі зростає, тому що він є більш економічним і, на відзнаку від постійного струму, вважається корозійно безпечним. Проте аналіз літературних даних і багаторічні спостереження вчених Української державної академії залізничного транспорту (УкрДАЗТ) свідчать про те, що для багатьох обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій мостів, тунелів, водопропускних труб, інших споруд на електрифікованих змінним струмом ділянках залізниць, а також інших обводнених конструкцій, що перебувають під впливом високовольтної змінної напруги, зокрема ліній електропередачі (ЛЕП), спостерігається їх інтенсивна електрокорозія.

Разом з тим заходи щодо запобігання електрокорозії залізобетонних та інших конструкцій змінним струмом у нормативних документах для залізничних споруд не передбачаються. Однією з причин цього є специфіка процесів електрокорозії бетону, залізобетону та розчину в обводнених конструкціях, що не укладається в рамки традиційної електрофізики й електротехніки, та відсутність у зв'язку з цим єдності думок різних вчених і фахівців щодо впливу змінного струму на залізобетонні, бетонні та кам'яні конструкції.

Виходячи з викладеного тема дисертації, присвячена розкриттю механізму впливу змінного струму витоку та змінної високовольтної напруги на бетонні, залізобетонні й кам'яні конструкції інженерних споруд залізниць для підвищення ефективності їх захисту, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі «Будівельні матеріали, конструкції та споруди» УкрДАЗТ в рамках держбюджетних НДР за темами: «Розробка теоретичних і експериментальних основ захисту від електрокорозії споруд залізничного транспорту» (№ ДР 0108U000076) і «Розробка теоретичних основ і експериментальні дослідження впливу струмів витоку та блукаючих струмів на бетон і розчин бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій» (№ ДР 0110U002128), а також госпдоговірних НДР за планами НДДКР «Укрзалізниця», планами Південної залізниці й інших підприємств.

**Мета дослідження** – розкриття механізму впливу змінного струму витоку та високовольтної напруги на бетонні, залізобетонні та кам'яні інженерні споруди залізниць для підвищення ефективності їх захисту від електрокорозії на основі фундаментальних уявлень про електроповерхневі явища в дисперсних системах і матеріалах, колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки.

**Наукова гіпотеза:** змінний струм витоку та високовольтна напруга викликають в обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкціях штучних споруд переважające винесення катіонів кальцію  $Ca^{2+}$  з гідросилікатного гелю цементного каменю, що призводить до виникнення в конструкціях напружень що розтягують, а також електрокорозії цементного каменю, що полягає в розчиненні й винесенні з нього портландиту, гідроалюмінатів і гідросульфалюмінатів кальцію.

Збільшення електрокорозійної стійкості цементного каменю й бетону та захист споруд від електрокорозії можуть бути досягнуті за рахунок запобігання винесення продуктів розчинення цементного каменю з бетону, зокрема за допомогою металоін'єкційних обшивок із глибинним заземлювачем, улаштуванням різних захисних екранів і т.п.

**Завдання дослідження** - обстеження стану будівель і споруд поблизу електрифікованих змінним струмом залізничних колій, виявлення впливу змінних струмів витоків та високовольтної напруги на знос штучних споруд;

- огляд і критичний аналіз літературних даних, узагальнення результатів досліджень впливу змінного струму витоків на цементний камінь і бетон, бетонні, залізобетонні та кам'яні конструкції і споруди;

- дослідження в експлуатаційних умовах і встановлення характерних ознак руйнування конструкцій змінним струмом і напругою, характерних шляхів протікання змінного електричного струму від рейкової колії в ґрунті та від контактного проводу конструкціями;

- розробка спеціальних методик досліджень і лабораторних установок для дослідження впливу змінного потенціалу й струму на цементний камінь і бетон;

- експериментальні дослідження тривалого впливу змінної напруги різної величини на властивості обводненого бетону та зміну сили струму в ньому;

- опис механізму (у вигляді схем і рівнянь) електрокорозійного ушкодження цементного каменю й бетону під дією змінного електричного поля, встановлення його впливу на довговічність бетону;

- розробка, експлуатаційна перевірка та впровадження ефективних способів захисту бетону та споруд, розташованих поблизу електрифікованих змінним струмом залізничних колій, і відповідних рекомендацій.

**Об'єкт дослідження** – цементний камінь, бетон, залізобетонні та кам'яні конструкції споруд залізниць, електрифікованих змінним струмом.

**Предмет дослідження** – механізми впливу змінних струмів витоків та високовольтної напруги на цементний камінь і бетон, процеси, взаємодії і явища в дисперсних системах, механізми захисту.

**Методи дослідження.** Зміна властивостей бетону в результаті впливу змінного електричного струму досліджували в такий спосіб: вплив моделювали за оригінальними методиками за допомогою спеціально розроблених і виготовлених лабораторних установок і датчиків; фізико-механічні властивості бетону визначали стандартними методами; фазовий склад цементного каменю – за допомогою фізико-хімічних методів (рентгенофазового аналізу); електричні характеристики бетону – за допомогою спеціально розроблених методик і лабораторних установок. Характеристики поширення електричного поля від струму витоків з рейок на обводнені конструкції й споруди досліджували відповідно до розроблених спеціальних методик і схем вимірювань за допомогою цифрових мультиметрів і спеціальних датчиків.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Встановлено, що електрокорозійне руйнування цементного каменю й бетону обумовлено однобічною провідністю в електричному полі гідросилікатного гелю, електроміграційним і дифузійним перенесеннями іонів. Електрокорозія арматури здійснюється шляхом винесення з неї катіонів  $Fe^{2+}$ , що супроводжується винесенням з арматури вільних електронів, їхнім

переходом на протони  $H^+$  у гідроксильних комплексах типу  $OH^- - H^+ - OH^-$ , які підходять до поверхні арматури за естафетним механізмом.

2. Надано кількісний опис основних процесів і механізмів електрокорозії бетону: електроміграційного переносу на основі рівняння стаціонарного потоку в капілярі, естафетного та електроміграційного перенесення та уявлень про гігантську низькочастотну діелектричну дисперсію дисперсних систем; впливу переважного перенесення катіонів у гідросилікатному гелі на коефіцієнт дифузії іонів у бетоні, розглянутого на основі рівняння Ейнштейна для коефіцієнта дифузії колоїдних часток, а також першого закону Фіка для дифузійного переносу речовини; впливу електричного поля негативно зарядженої поверхні часток гідросилікатного гелю на коефіцієнт дифузії катіонів  $Ca^{2+}$  у граничному шарі води, що обумовлено гальмуванням дифузії під впливом взаємодії між іоном  $Ca^{2+}$  і потенціалвизначальним іоном  $OH^-$  гелевої частки. Згідно з отриманими рівняннями, коефіцієнт дифузії катіонів  $Ca^{2+}$  у граничному шарі перебуває у зворотній пропорційній залежності від діелектричної проникності води в цьому шарі та у зворотній квадратичній залежності від В/Ц.

3. Встановлено залежність коефіцієнтів дифузії бетону від його марки за водопроникністю  $W$  і В/Ц, на основі якої удосконалено класифікацію бетонів за проникністю, прийнятою у ДСТУ Б В.2.6-145-2010.

4. Встановлено вплив тривалої дії циклічної змінної напруги 220, 80, 40, 10 і 5В і проточної води на зміну струму, що протікає через зразок бетону. При цьому встановлено, що напруга 40 В у сполученні з потоком води викликає максимальну втрату ваги  $C_3A$  і  $C_3S$  і найбільшу втрату міцності бетону.

5. За допомогою фізико-хімічних досліджень встановлено, що циклічна дія змінної напруги 40 В призводить до інтенсивного розчинення  $Ca(OH)_2$ , розчинення  $C_3S$  та інших мінералів цементного каменю, 80 В – до інтенсивного розчинення гідросульфоалюмінатів кальцію, 10 В –  $C_3A$ . Циклічна дія напруги 5 В призводить до розчинення гідросульфоалюмінатів кальцію, але не забезпечує винесення продуктів розчинення.

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблено схеми й конструктивні рішення захисту від електрокорозії конструкцій і будівель від дії змінної напруги й струмів витоку, у т.ч.: за допомогою суцільних сталевих екранів, сітчастих екранів або рідкоскляних екранів із глибинними заземлювачами. Рекомендовано заміну на шпалах або плитах безбаластного мостового полотна скріплень типу КБ або КПП-5 на пружні скріплення УС-1 або PRS-4 з анкерами на сірчаній мастиці, які мають набагато більший електричний опір порівняно з ними.

Результати досліджень використано при розробці проектів і впровадженні нових технологій захисту від електрокорозії, відновленні й посиленні аварійних водопропускних труб (111 та 119 км ділянки Харків – Куп'янск Південної залізниці), шляхопроводу (802 км ділянки Гребінка – Черкаси Південної залізниці), інших об'єктів.

З урахуванням результатів дисертаційного дослідження та при особистій участі здобувача розроблено такі інструктивні документи Укрзалізниці: «Рекомендації з захисту конструктивних елементів будівель та споруд, що

експлуатуються, від агресивних дій»; «Рекомендації з захисту та підсилення будівель і споруд станційних комплексів, що руйнуються від спільної дії електричного струму, вібрації, ґрунтових вод»; «Галузеві будівельні норми України (проект). Споруди транспорту. Захист будівельних конструкцій та споруд залізничного транспорту від агресивних дій»; «Рекомендації із захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів, на яких закріплена контактна мережа»; «Рекомендації із захисту та підсилення конструкцій пасажирських платформ на електрифікованих ділянках залізниць».

Матеріали дисертації використовуються в УкрДАЗТ в навчальному процесі при підготовці спеціалістів і магістрів за спеціальностями «Залізничні споруди та колійне господарство», «Промислове та цивільне будівництво»: у лекційних курсах, на лабораторних, практичних заняттях, у дипломному проектуванні.

Економічний ефект від впровадження результатів досліджень обумовлений виконанням капітального ремонту в сполученні з захистом від електрокорозії ушкоджених конструкцій замість їхньої повної заміни становить 137 тис. грн. Соціальний ефект від впровадження полягає в підвищенні безпеки руху поїздів на ділянках з відремонтованими спорудами.

**Особистий внесок здобувача.** Критичний аналіз існуючих уявлень з досліджуваних питань, узагальнення даних про стан споруд після тривалої експлуатації, експериментальні дослідження та аналіз більшої частини результатів, розрахунки за розробленими рівняннями і формулами, виконання схем і конструкцій захисту від електрокорозії, експлуатаційна перевірка результатів впровадження виконані автором особисто. Розробка наукової гіпотези та нових наукових положень виконані разом з науковим керівником, впровадження результатів досліджень – разом із співавторами публікацій, яким автор висловлює щире подяку. Особистий внесок у публікаціях відбитий у переліку опублікованих праць.

**Апробація результатів дисертації** проведена на 17-й Міжнародній конференції з будівельних матеріалів «17.Ibausil», Веймар, Німеччина, 23–26 вересня 2009 р.; 3-й науково-технічній конференції «Математичні моделі процесів у будівництві» (Залізобетонні конструкції та матеріали), Луганськ, 24–25 березня 2010 р., 3-й Міжнародній конференції з будівельних матеріалів, конструкцій і споруд «Проблеми надійності й довговічності інженерних споруд і будинків на залізничному транспорті», Харків, 12–13 квітня 2011 р., 70–73 Міжнародних науково-технічних конференціях кафедр УкрДАЗТ і фахівців залізничного транспорту і підприємств (2008÷2011 рр.).

**Публікації.** Результати дисертаційного дослідження опубліковані в 11 статтях у виданнях з переліку ВАК України, а також додатково – у 2 друкованих працях і 3 патентах на винаходи.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку літератури із 147 найменувань і містить 154 сторінок основного тексту, 136 рисунків, 22 таблиці, 5 додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання досліджень, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, надано відомості про апробації роботи та публікації, структуру та обсяг дисертації.

**У першому розділі** виконано критичний аналіз існуючих вітчизняних і закордонних літературних джерел про вплив змінного струму на металеві, залізобетонні та бетонні конструкції.

На думку більшості вчених, змінний струм, як і постійний, практично не впливає на бетон і тому останній можна вважати стійким до впливу змінного електричного струму. Із приводу впливу змінного струму на металеві конструкції, а отже, на арматуру в бетоні, думки дуже суперечливі.

Проаналізовано та встановлено джерела і шляхи попадання електрополя від змінної напруги на штучні споруди залізничного транспорту: від колії, контактного проводу та ліній електропередачі (ЛЕП).

Виконано критичний аналіз існуючих методів і способів контролю електрокорозійного стану конструкцій, факторів руйнуючого впливу та способів захисту конструкцій від електрокорозійного впливу змінної напруги та струму.

Виконаний критичний аналіз дозволив авторові дисертації дійти висновку, що блукаючі змінні струми для підземних металевих конструкцій, а також надземних металевих і залізобетонних конструкцій є небезпечними. Незважаючи на наявні в значній кількості дослідження та наукові публікації усунення цього виду корозії є важким завданням. Однією з причин цього, на думку автора, є недостатньо точний опис механізму виникнення струмів витоку та блукаючих струмів у залізобетонних спорудах і конструкціях і корозійного ушкодження цими струмами бетону в захисних шарах конструкцій. Це викликає необхідність проведення досліджень конструкцій і впливу на них змінних струмів витоку з рейкової колії, високовольтного змінного електрополя від контактних проводів і ліній електропередачі (ЛЕП).

**У другому розділі** дано характеристики основних матеріалів і методів досліджень. Використано стандартні матеріали: портландцемент; пісок кварцовий; щебінь гранітний; воду водопровідну; домішку-суперпластифікатор Поліпласт СП-1. Для гідроізоляції бічних поверхонь бетонних зразків використано захисний склад ЗС-3М ТУ У 01116472-105 для вологих і мокрих поверхонь залізобетонних конструкцій і парафін технічний ДСТУ 4153.

Для вимірювання потенціалів і струмів застосовано сучасні прилади й засоби: цифровий мультиметр Sanwa PC510 (Японія), ПК і ПЗ PC Link (Plus) v.2.10. Для вимірювань на бетонній, залізобетонній або кам'яній поверхні застосовано спеціальний датчик, у якому контакт із поверхнею здійснюється через губку, змочену розчином мідного купоросу. Для моделювання впливу електричного поля на бетон було сконструйовано спеціальні лабораторні установки та розроблено оригінальну методика досліджень. Після впливу електричного поля визначали безнапірну водопроникність бетону, відкриту пористість, міцність при стиску. Фізико-хімічні дослідження цементного каменю виконано за допомогою рентгенофазового аналізу. Рентгенограми одержано за допомогою модернізованого дифрактометра ДРОН-3, ПК і ПЗ DIFWIN1.

**У третьому розділі** наведено дані експлуатаційних досліджень стану бетонних, залізобетонних, металевих і кам'яних конструкцій, величин і кінетики зміни електричних потенціалів на рейках і конструкціях, а також схеми протікання струмів через них в умовах дії змінних струмів витоку з

рейкової колії, змінної високовольтної напруги від контактних проводів на електрифікованих ділянках залізниць, а також змінного струму від високовольтних ЛЕП.

При дослідженні стану цегляних конструкцій водопропускних труб виявлено такі характерні uszkodження: великі за площею відколи цегляної кладки; відшарування зовнішнього ряду цегли з попереднім утворенням плоскої тріщини відриву, втрата адгезії між цеглою і розчином, випадання каменів і руйнування кладки в замку аж до наскрізного вивалу. Проведено визначення міцності зразків цегли і розчину, відібраних із кладки у зоні пошкоджень, розрахунок напружено-деформованого стану конструкцій труб з урахуванням залишкових властивостей цегли й кладки. У результаті встановлено, що більші за площею пошарові відколи, зниження міцності цегли та адгезії розчину у швах до неї від дії ваги ґрунту і поїздів, що рухаються, відбулися не могли. Основними факторами таких руйнувань є поляризація розчину кладки під дією змінного струму витоку з рейкової колії та накопичення надлишкового позитивного заряду в її поверхневому шарі.

Встановлено також характерні руйнування залізобетонних конструкцій від дії змінного струму витоку та високовольтної напруги. Від струмів витоку – це тріщини, нарости продуктів вилуговування, руді плями корозії арматури на бетоні, що розтікаються убік від арматури. Від напруги в контактних проводах – відшарування захисного шару та сильна корозія арматури в зоні контактних проводів. Від струмів витоку з високовольтних ЛЕП – вилуговування розчину, корозія арматури, обвал кам'яного облицювання в конструкціях набережних у зоні опор ЛЕП.

**Четвертий розділ** присвячено розвитку теоретичних уявлень про механізм дії змінного струму.

Виникнення сил, які розтягують і напруг у поверхневих шарах кладки, що призводять до утворення тріщин, зниження міцності цегли та адгезії розчину до неї, обумовлено виникненням надлишкового позитивного заряду в поверхневому шарі цегляної кладки. Це, у свою чергу, обумовлено однобічною провідністю в електричному полі гідросилікатного гелю, що має велику питому поверхню. При цьому під впливом позитивного потенціалу, що з'являється в кожний напівперіод коливань напруги (позитивний), протиіони (ПРІ)  $Ca^{2+}$  в ПЕШ часток гелю переміщуються вглиб цементного каменю електроміграційним шляхом. Переміщення потенціал визначальних іонів (ПВІ)  $OH^-$ , міцно зв'язаних з поверхнею часток, при цьому виключається. За один напівперіод коливань ПРІ  $Ca^{2+}$  виходять за межі ПЕШ і переміщуються дифузійним шляхом вглиб розчину цегляної кладки або бетону. У результаті на внутрішній поверхні кладки виникають позитивні заряд і потенціал, а на поверхні з боку ґрунту – негативні. У водопропускних трубах з постійним або частим водотоком ці процеси супроводжуються вилуговуванням розчину кладки в середині труби. При цьому поверхневий шар розчину набуває негативного потенціалу, що призводить до ослаблення адгезії розчину до цегли.

Змінне поле від високовольтної напруги в контактному проводі викликає в позитивний напівперіод напруги однобічний дифузійний потік ПРІ  $Ca^{2+}$  по бетону конструкції у напрямку «землі». ПВІ  $OH^-$  на частках гелю, як зазначалося, хімічно зв'язані з поверхнею цих часток і не можуть переміщатися.



При цьому виникає поділ зарядів з утворенням макродиполя вздовж конструкції та, відповідно, різниця потенціалів, звернена негативним полюсом до контактного проводу та позитивним до «землі». При виході поїзда із секції та за межі шляхопроводу цей наведений макродиполь і відповідні йому екстремальні зміни вимірюваного потенціалу зникають.

У кожний негативний напівперіод коливань ПРІ  $Ca^{2+}$  електроміграційним шляхом переміщуються через обводнені капіляри захисного шару бетону на його поверхню (у бік контактного проводу). ПВІ  $OH^-$ , зв'язані поверхнею часток, залишаються на місці. Будучи гідратованими, ПРІ  $Ca^{2+}$  захоплюють воду, так що в цей напівперіод виникає своєрідний електроосмотичний потік рідкої фази по всій поверхні гідросилікатного гелю. Електроміграційному потоку перешкоджає сила тертя об стінки капілярів, що відбувається по лінії ковзання води в ПЕШ. При рівності рушійної сили  $F_{EM} = F_{TR}$  встановлюється стаціонарний потік. Виведено формулу для лінійної швидкості електроміграційного потоку ПРІ  $Ca^{2+}$  у бетоні  $V$ , м/с:

$$V = \frac{U \varepsilon \varepsilon_0 \zeta \alpha \gamma^F \delta_{СК}}{l_{КП} d_1 \eta}, \quad (1)$$

де  $U$  – величина змінної напруги, В;  $\varepsilon$  і  $\varepsilon_0$  – відносна діелектрична проникність води і електрична стала ( $8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м);  $\zeta$  – електрокінетичний потенціал часток гелю, В;  $\alpha$  – ступінь гідратації цементу;  $\gamma^F$  – частка гідросилікатного гелю в продуктах гідратації (близько 0,75);  $\delta_{СК}$  – відстань від лінії ковзання до стінки капілярів, м;  $l_{КП}$  – відстань від контактного проводу до конструкції, м;  $d_1$  – відстань між шарами ПВІ та негідратованими ПРІ;  $\eta$  – в'язкість води, Па·с.

При підстановці відповідних значень швидкість потоку катіонів складала  $V = 25 \times 10^{-6}$  м/с, а довжина шляху, що вони проходять за 1 напівперіод коливань змінного струму  $l_{EM} = 0,25$  мкм. Це значно перевищує товщину ПЕШ на частках і відповідає розмірам капілярів у гідросилікатному гелі.

Зважаючи на те, що питома поверхня й частка гідросилікатного гелю в продуктах гідратації цементу є переважною, загальна кількість винесених ПРІ  $Ca^{2+}$  також буде переважною. Виникає надлишкова концентрація катіонів  $Ca^{2+}$  і  $OH^-$  на поверхні захисного шару бетону. При цьому потоки води по поверхні бетону будуть уносити з собою ці іони. У результаті при зміні полярності напруги в проводах у бетон буде повертатися менша кількість іонів  $Ca^{2+}$  і  $OH^-$ , що викличе зниження рН і, відповідно, вилугування портландиту.

При виникненні напруги в контактному проводі відбувається також поляризація зі зсувом вільних електронів поперек арматурного стержня, при цьому в кожний напівперіод коливань напруги виникають анодна й катодна зони і відповідні їм миттєві електрохімічні реакції.

При негативному напівперіоді напруги в контактному проводі катіони  $Fe^{2+}$  будуть відриватися від анодних ділянок, переходити в розчин, накопичуючись біля арматури. Їх подальше перенесення в об'єм може здійснюватися під впливом дифузії в шар протиіонів ПЕШ негативно заряджених часток гідросилікатного гелю.

При зміні полярності напруги катіони  $Fe^{2+}$  не можуть повернутися в арматуру через міцний зв'язок із шаром ПВІ  $OH^-$  частки. Таким чином, з кожним періодом напруги буде відбуватися безповоротне винесення катіонів

$Fe^{2+}$  й закріплення їх у ПЕШ часток гелю, а на поверхні арматурного стержня буде накопичуватися, відповідно, надлишок електронів. Однак таке винесення катіонів  $Fe^{2+}$  з арматури незабаром зупиниться, якщо не буде паралельно відбуватися катодна реакція з переходом вивільнюваних електронів на атоми кисню або протони  $H^+$  з їх відновленням. Проте в рідкій фазі бетону ( $\approx pH12$ ) концентрація протонів мізерно мала, а надходження кисню з повітря сильно обмежено захисним шаром бетону. Разом з тим у лужних розчинах, як відомо, є в рівноважній кількості гідроксильні комплекси типу  $OH^- - H^+ - OH^-$ , концентрація яких тим більша, чим вище  $pH$ . Під впливом позитивного потенціалу на контактному проводі, а також електричного поля звільнених електронів, протони  $H^+$  із цих комплексів переміщуються за естафетним механізмом Гротгуса (майже безперешкодно) до поверхні арматури і відбирають електрони на своє відновлення (рис.1, а, б, в). При такій нейтралізації електронів, що звільнилися, шляхом окислювання протонами знову з'являється можливість відриву катіонів  $Fe^{2+}$  від арматури.

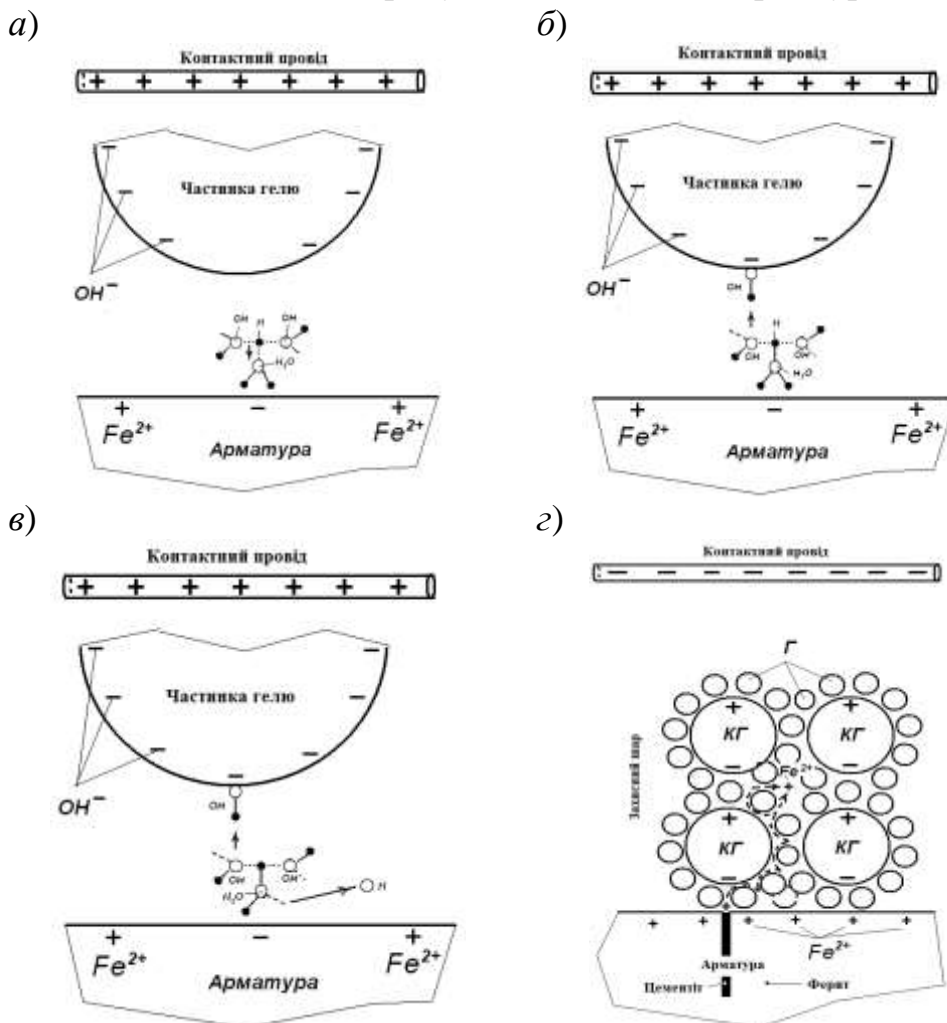


Рис. 1. Схеми естафетного та електроміграційного перенесення катіонів  $Fe^{2+}$  і гідроксильних іонів  $OH^-$  під впливом змінної напруги в контактному проводі

При виникненні надлишкового позитивного заряду в бетоні виникають також сили відштовхування між катіонами заліза, що викликають розтягувальні напруження в бетоні (точніше його захисному шарі). Зв'язування аніонів  $OH^-$  у гідроксида  $Fe(OH)_2$  призводить до зменшення  $pH$ , розчинення й винесення в цих умовах  $Ca(OH)_2$ , корозії бетону вилуговуванням. Катіони заліза, що вбудовуються в шар ПРІ  $Ca^{2+}$  найближчих частинок гелю, захоплюються

електроміграційним потоком протиіонів  $Ca^{2+}$ , у результаті чого концентрація катіонів  $Fe^{2+}$  зростає на боці, протилежному арматурі.

Електричне поле контактного проводу поляризує також дисперсні частинки цементного каменю шляхом зсуву ПРІ в ПЕШ цих частинок. При переході змінної напруги через нуль катіони  $Fe^{2+}$  і  $Ca^{2+}$  повертаються під впливом дифузії, а також у напрямку від частинки у бік контактного проводу. При зміні полярності змінного електричного поля вони переміщуються електроміграційним шляхом у зворотному напрямку. При цьому зворотний електроміграційний потік катіонів дорівнює прямому і ПЕШ буде поляризуватися в такт із частотою поля.

Таке переміщення в електричному змінному полі ПРІ  $Fe^{2+}$  приводить за напівперіод коливань напруги до виникнення короткочасного величезного дипольного моменту на частинках гелю та ще більшого на частинках кристалогідратів у зв'язку з накопиченням великої кількості зарядів на протилежних сторонах частинок і величезного плеча між ними (рис.1, з) у порівнянні із плечем у звичайних дипольних моментах молекул полярних речовин, наприклад, молекул води. У літературі це явище називається гігантською низькочастотною діелектричною дисперсією, а дипольний момент – гігантським дипольним моментом. Відстань, на яку переміщуються катіони  $Fe^{2+}$  і  $Ca^{2+}$  за один напівперіод коливань напруги, може бути визначена за виразом

$$b = \sqrt{\frac{D}{\pi f}} \quad (2)$$

На відміну від розчинів, коефіцієнт дифузії іонів у бетоні змінюється в дуже широкому інтервалі. Для бетону з найвищою проникністю ( $D \approx 1 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ )  $b = 17,8$  мкм, для бетону з особливо низькою проникністю ( $D \approx 4 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ )  $b = 1,1$  мкм, а для бетону з найнижчою проникністю, як у залізобетонних шпалах ( $D \approx 0,00000000051 \text{ м}^2/\text{с}$ ),  $b = 0,027$  мкм.

Звідси отримуємо висновок про залежність інтенсивності процесів електрокорозії арматури бетону в змінному електрополі від дифузійного переносу іонів  $Fe^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  і гідроксильних іонів  $OH^-$ .

На підставі викладеного кількісний опис механізму електрокорозії арматури в залізобетоні від змінного струму повинен впливати з розуміння природи зміни коефіцієнта дифузії іонів у бетоні. Природа такої зміни коефіцієнта дифузії іонів у бетоні розглянута на основі рівняння Ейнштейна для коефіцієнта дифузії  $D$  колоїдних частинок, а також першого закону Фіка для дифузійного перенесення речовини  $dn_i$ :

$$D = \frac{kT}{6\pi \cdot \eta \cdot r}, \quad dn_i = D_i s \cdot \frac{dc_i}{dx} \cdot dt \quad (3)$$

Відповідно до цих формул досліджено залежності коефіцієнтів дифузії іонів в бетоні від концентрацій електроліту  $c$ , радіусів іонів  $r$ , а також від В/Ц при температурі  $T = 293$  К. Знайдено залежності між водопроникністю  $W$  і водоцементним відношенням В/Ц, а також коефіцієнтів дифузії бетону  $D$  від його марки за водопроникністю  $W$ . На основі цих залежностей удосконалено класифікацію бетонів за проникністю, прийняту в ГОСТ 31384-2008, ДСТУ Б В.2.6-145-2010. Зокрема, до трьох груп (Н – бетон нормальної проникності; П – бетон зниженої проникності і О – бетон особливо низької проникності)

додано ще дві групи з відповідними границями марки за водопроникністю  $W$ ,  $B/C$  і коефіцієнтом дифузії  $D$ : Бетон високої проникності ( $W1$ ;  $B/C = 1$ ;  $D \approx 0,0001 \text{ см}^2/\text{с}$ ); бетон найнижчої проникності ( $W10$ ;  $B/C = 0,35$  і  $D \approx 0,000000001 \text{ см}^2/\text{с}$ ). Бетону високої проникності відповідає бетон класу  $B 7,5$ , а бетону найнижчої водопроникності  $W10$  відповідає міцний бетон, наприклад, залізобетонних шпал.

Представлено кількісно механізм впливу електричного поля негативно зарядженої поверхні часток гідросилікатного гелю на коефіцієнт дифузії катіонів  $Ca^{2+}$  у граничному шарі води. Він заснований на тому, що дифузія іона в граничному шарі води гальмується під впливом енергії взаємодії між ПРІ  $Ca^{2+}$  і ПВІ  $OH^-$  на поверхні гелевої частинки. Виведено рівняння для коефіцієнта дифузії катіона  $Ca^{2+}$  у граничному шарі:

$$D_{\text{эс}} = D \frac{u_{\text{эс}}}{kT}, \quad (4)$$

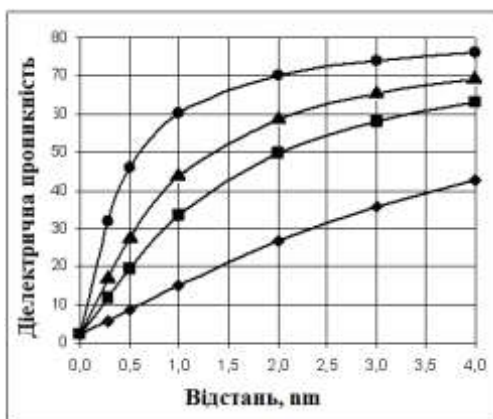
де  $u_{\text{эс}}$  – робота, яку здійснює іон при його відриві від молекули води.

Величина  $u_{\text{эс}}$  визначається за виразами

$$u_{\text{эс}} = \frac{ze^2 \cdot (r_{H_2O} + r_{Ca^{2+}})}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \cdot (\delta_{GC})^2}, \quad \delta_{GC} = \frac{C \cdot \left[ \frac{B}{C} - \alpha \cdot \left( \frac{B}{C} \right)_{\text{хс}} - \frac{V_{\text{ПВС}}^F}{C} \right]}{C\alpha\gamma^F s^F}, \quad (5)$$

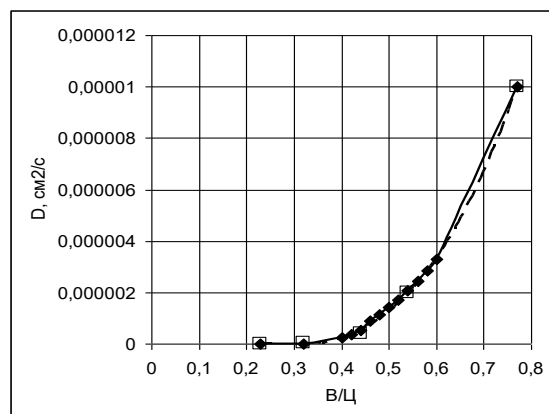
де  $\delta_{GC}$  – товщина шару води на частинках гідросилікатного гелю;  $(B/C)_{\text{хс}}$  – водоцементне відношення, що відповідає хімічно зв'язаній у цементі воді;  $\alpha$  – ступінь гідратації цементу, 0,5;  $\gamma^F$  – частка гідросилікатного гелю в продуктах гідратації цементу, 0,75;  $s^F$  – питома поверхня гідросилікатного гелю, 200–700  $\text{м}^2/\text{м}$ .

У граничних шарах на молекули води впливає сильне електричне поле поверхні. Використовуючи формулу для визначення діелектричної проникності води у граничному стані, визначено величину  $\epsilon_{GC}$  і подано графічно залежність  $\epsilon_{GC}$  від відстані  $\delta$  від поверхні для різних електроповерхневих потенціалів, властивих гідросилікатам кальцію різної основності (рис.2).



—◆— 1 В; —■— 0,37 В;  
—▲— 0,24 В; —●— 0,11 В

Рис.2. Залежність  $\epsilon$  води в граничних шарах від відстані до поверхні частинки



—◆— розрахункова крива;  
—□— дані СНИП і експериментальні з літературних джерел

Рис.3. Залежність коефіцієнта дифузії бетону від  $B/C$

За даними В/Ц,  $\delta$  і  $\varepsilon_{ГС}$  виконано розрахунок коефіцієнтів дифузії катіонів  $Ca^{2+}$  у бетонах для  $D = 1,15 \text{ см}^2/\text{с}$  (відповідає концентрації гідроксиду кальцію в бетоні 0,02 моль/л) і побудовано відповідний графік зміни  $D_{ГС}$  для різних В/Ц бетону (рис. 3).

Високий ступінь збігу розрахункової та експериментальної кривих свідчить про коректність кількісного опису механізму впливу змінного струму на електрокорозію бетону та арматури.

**П'ятий розділ.** Експериментальна частина дисертації присвячена перевірці викладених у попередніх розділах нових теоретичних уявлень про вплив змінного струму витoku з рейкової колії на бетон в обводнених бетонних і залізобетонних конструкціях. Для цього виділено та зображено схематично за допомогою фотознімків реальних споруд основні шляхи протікання струму через конструкцію у воду. Відповідно до них розроблено еквівалентні їм 2 лабораторні схеми, у яких гідроізолюваний з боків бетонний зразок-куб занурений у ємність з водою. При цьому за однією схемою бетонний зразок безпосередньо контактує з водою нижньою стороною, а напруга подається між верхнім електродом і сталеву ємністю (рис.4). За іншою схемою бетонний зразок контактує з водою через сталевий електрод з отворами, а напруга подається між ним і верхнім електродом (рис.5).

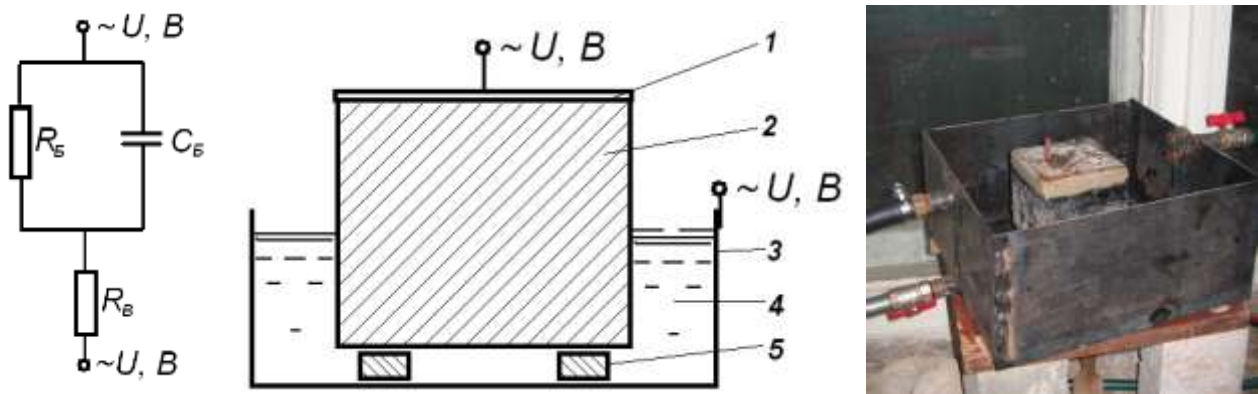


Рис. 4. Еквівалентна схема (ліворуч) і лабораторна установка, що відповідає протіканню струму витoku з рейки через бетон конструкції, що контактує з водою безпосередньо або через потік дощової води:

1 – верхній електрод з отворами; 2 – бетонний зразок;  
3 – сталеву ємність; 4 – вода; 5 – ізолюючі прокладки-опори

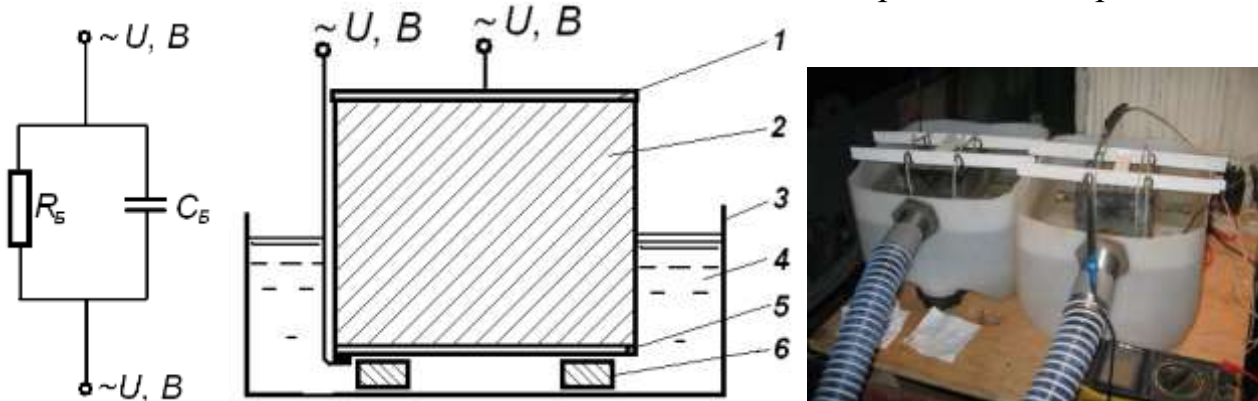


Рис. 5. Еквівалентна схема протікання струму витoku з рейки через бетон конструкції, що контактує з водою через сталевий електрод:

1 – верхній електрод з отворами; 2 – бетонний зразок; 3 – полімерна ємність; 4 – вода; 5 – нижній електрод з отворами; 6 – ізолюючі опори

Дослідження проводили на серіях зразків-кубів, на які подавалася різна змінна напруга: 220 В (металева ємність); 80, 40, 10 і 5 В (пластикова ємність).

Графіки зміни виміряного та наведеного (до величини напруги 220 В, яка подавалася) струмів зображено на рис. 6. Згідно з цими графіками в кожному циклі в період впливу змінної напруги наведений струм, що протікає через зразок, збільшується приблизно на 15-20 мА, а при вимиканні напруги на 10 хв він знову зменшується. У перші цикли тривалого впливу виміряна напруга в колі була набагато меншою (близько 70 В) від зовнішньої. Через місяць обробки виміряна напруга стала збільшуватися, через 3 місяці досягла зовнішньої, а наприкінці обробки навіть перевищила її.

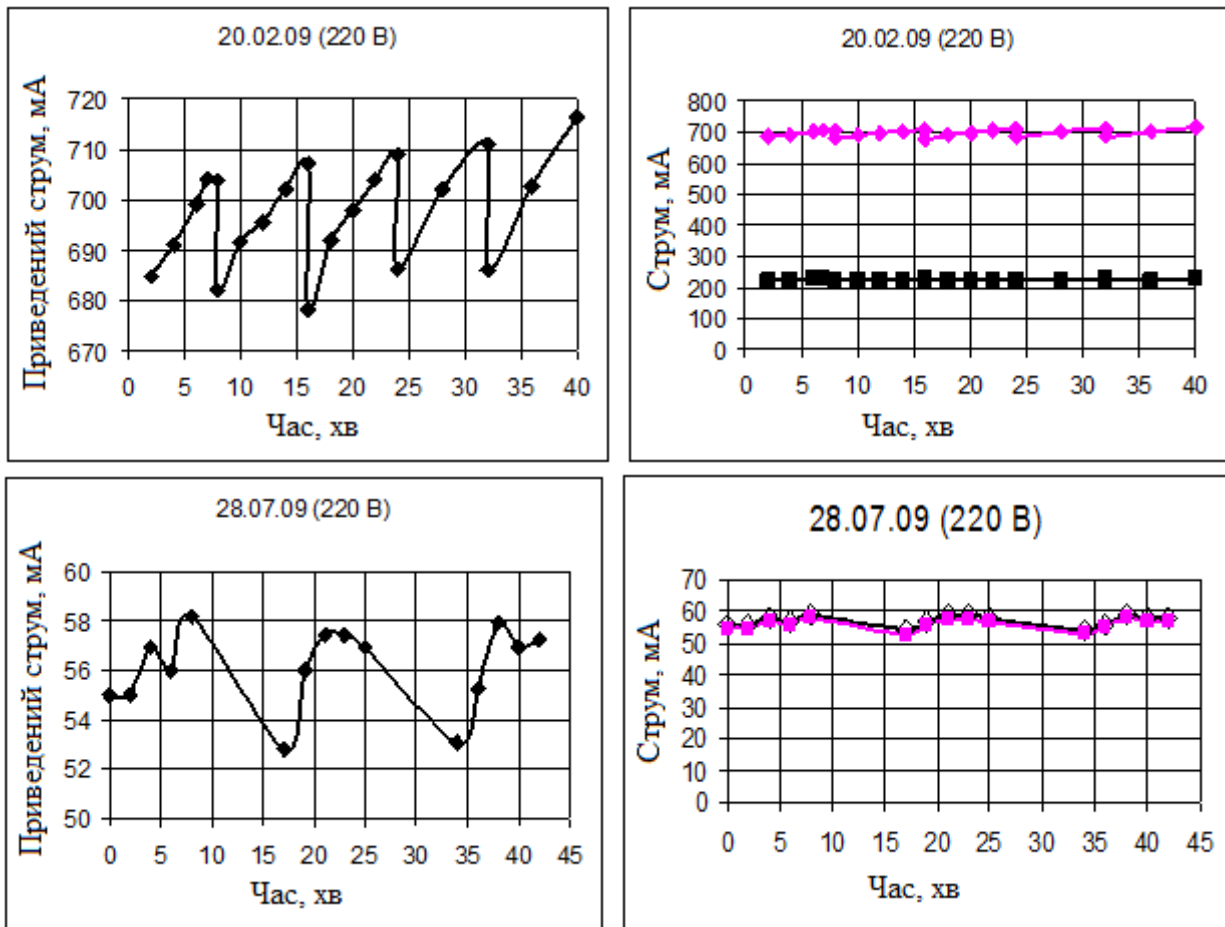


Рис. 6. Зміна значень струму в різних циклах впливу на бетонні зразки змінної напруги 220 В

Описаний характер зміни струму та напруги в колі свідчить про подвійний вплив пульсуючої змінної напруги. З одного боку, вона викликає збільшення струму в період обробки в циклі, з іншого, – односпрямовану поляризацію ПЕШ часток гелю в капілярах бетону та протилежно спрямовану їй поляризацію бетону за рахунок розчинення позитивно заряджених кристалогідратів.

Збільшення струму в період обробки в циклі може бути викликано розчиненням вихідних мінералів цементу або продуктів його гідратації та, відповідно, збільшенням активної складової провідності бетону. Значне зменшення виміряної змінної напруги обумовлено односпрямованою

поляризацією ПЕШ частинок гідросилікатного гелю під впливом зовнішньої напруги й виникненням негативної постійної різниці потенціалів  $-\Delta U$  у змінному полі.

Поступове збільшення вимірної напруги і її перевищення зовнішнього значення (наприкінці випробувань) може бути викликано поступовим розчиненням позитивно заряджених частинок кристалогідратів у нижній зоні бетонних зразків, що контактує з водою, виникненням макродипольного моменту та, відповідно, різниці постійних потенціалів  $+\Delta U$  (рис.7).

Зміна струму, що проходить через бетонний зразок протягом тривалого впливу на нього циклічної змінної напруги та потоку води, зображена на графіку рис. 8.

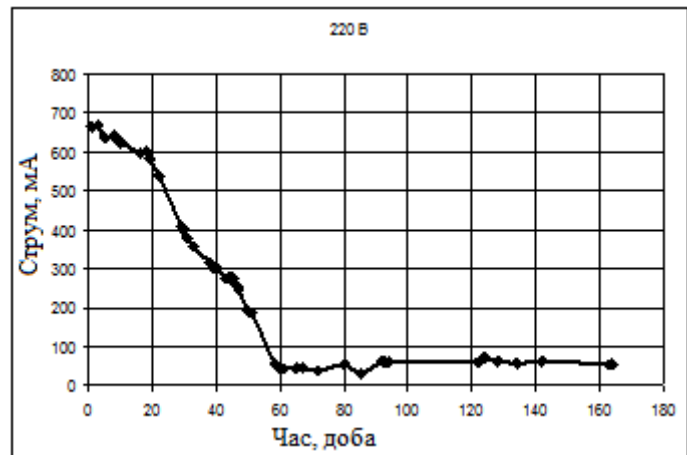
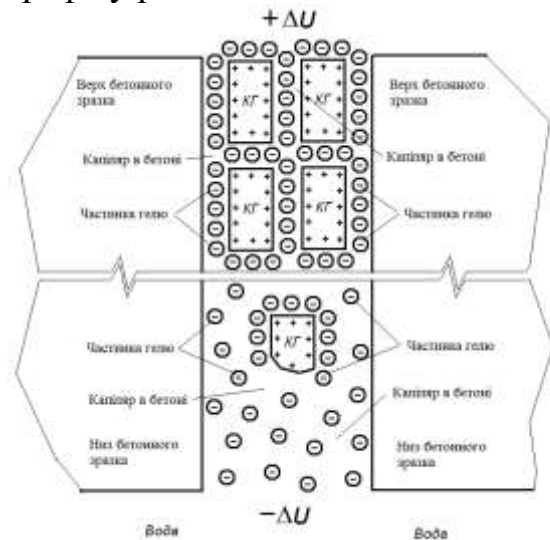


Рис.7. Схема односпрямованої поляризації бетону за рахунок розчинення кристалогідратів

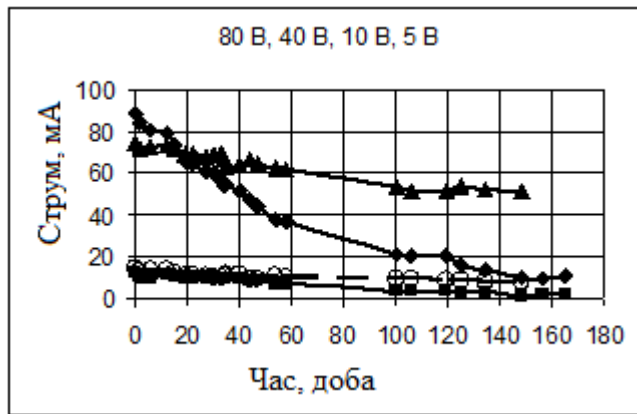
Рис.8. Зміна в часі струму, що проходить через бетон, протягом тривалого впливу на нього циклічної змінної напруги

Даний графік дозволяє побачити кінетику розчинення цементного каменю під впливом змінної напруги 220 В. Зокрема, активний розчинюючий вплив напруги на бетон проявляється протягом перших 2 місяців, після чого струм через зразок залишається приблизно на одному рівні незначної величини (30–70 мА). Це свідчить про вичерпання основних джерел розчинення, якими є найбільш активні мінерали клінкеру – трикальцієвий алюмінат  $C_3A$  і аліт  $C_3S$ , а також продукти їх гідратації – еtringіт  $C_3A \times 3CaSO_4 \times 32H_2O$  і портландит  $Ca(OH)_2$ .

Виконані експериментальні дослідження показали, що бетон, підданий тривалому впливу циклічної змінної напруги величиною 220 В та проточної води, має найбільшу безнапірну водопроникність і найменшу міцність (приблизно в 2 рази порівняно з бетоном, що експонувався в стоячій воді).

На рис. 9 зображено узагальнені криві зміни наведеного струму в часі при напрузі 80, 40, 10 і 5 В за час тривалих випробувань. У результаті аналізу експериментальних даних зі зміни змінного струму й різниці виникаючих при цьому постійних потенціалів у бетоні під час тривалих випробувань, а також узагальнених кривих на рис. 9 встановлено залежність між величиною напруги, що викликає розчинення мінералів клінкеру й продуктів їхньої гідратації, і їх електроповерхневими потенціалами  $\psi_{ЭП}$  (рис. 10).

Така залежність обумовлена тим, що для поляризації ПЕШ для розчинення частки з меншим за величиною потенціалом необхідно прикласти меншу напругу, а з більшим – більшу.



—◆— 40 В; —▲— 80 В;  
—○— 10 В; —■— 5В

Рис. 9. Узагальнені криві зміни струму при напрузі 80, 40, 10 і 5 В за час тривалих випробувань

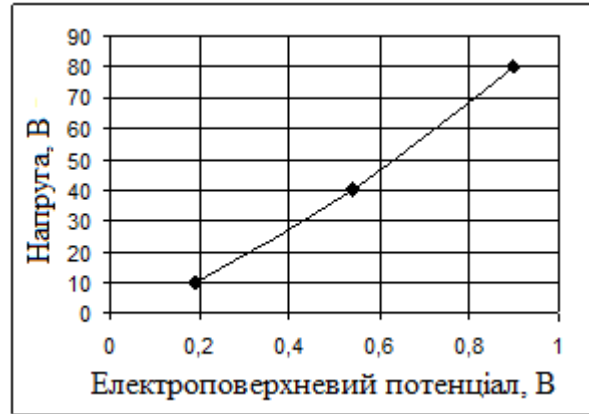


Рис. 10. Залежність між електроповерхневими потенціалами трикальцієвого алюмінату, портландиту та еtringіту і напругою, яка використовувалась у дослідженнях

Реальність руйнуючого електрокорозійного впливу змінної напруги величиною 80, 40, 10 і 5 В на бетон оцінювали експериментально за втратою маси бетонних зразків у часі при впливі напруги та за міцністю бетонних зразків після тривалої циклічної змінної напруги та потоку води, тільки потоку води та тільки стоячої води. Вважаючи, що втрата маси зразків відбувалася за рахунок розчинення найбільш активних мінералів цементу  $C_3A$  і  $C_3S$ , визначено величини втрати маси  $C_3A$  і  $C_3S$  у відсотках від їхньої вихідної кількості. Втрати виявилися дуже великими (11,8 і 58 %), особливо при напрузі 40 В (58 %).

Кількісну оцінку розчинюючої дії напруги визначили шляхом розподілу втрати маси в зразках, що перебували під впливом напруги й потоку води, на втрату маси зразка, що перебував тільки в потоці води (ступінь розчинення). Показано, що напруга 40 В викликає найбільшу розчинювальну дію (у 12 разів), порівняно з дією тільки потоку води, меншу 80 В, найменшу 5 В (у 8,3 рази). Це свідчить про те, що вплив імпульсної змінної напруги є набагато більш сильним, ніж тільки потік води. Про характер зміни втрат маси в часі дає уявлення графік на рис.11 для напруги 40 В.

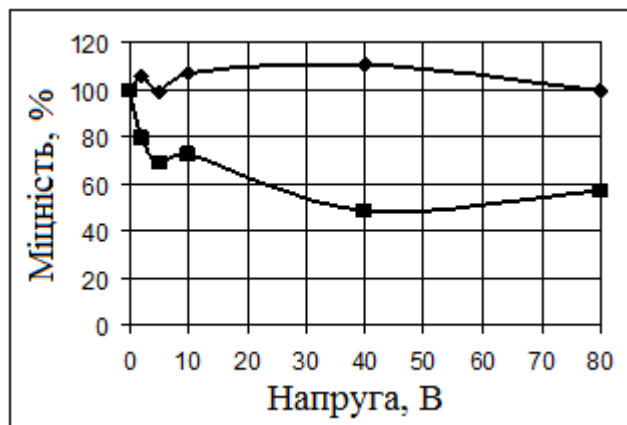
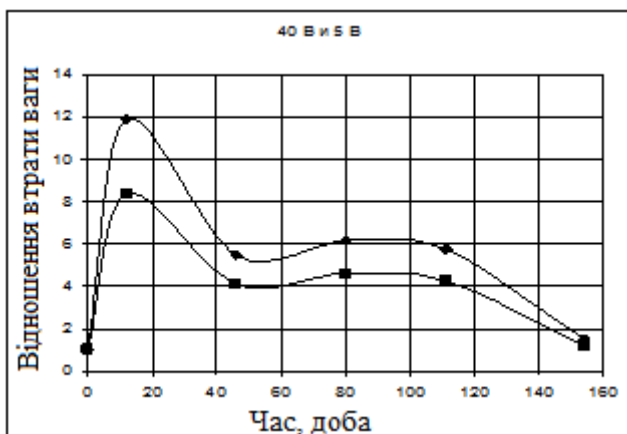


Рис. 11. Залежність ступеня

—◆— зона контакту з повітрям;



розчинення  $C_3A$  і  $C_3S$  при впливі змінної напруги 40 В (верхня крива) і 5 В (нижня крива)

—■— зона контакту з водою

Рис. 12. Зміна міцності при стисненні бетонних зразків при тривалому впливі змінного струму

Відповідно до узагальненого графіка на рис. 12 тривалий вплив пульсуючої змінної напруги та потоку води значно зменшує міцність бетонних зразків. Найбільше зменшення міцності викликано напругою 40 В (на 105 %).

Виконані рентгенографічні дослідження підтвердили, що циклічна змінна напруга  $U = 40$  В інтенсивно розчиняє портландит  $Ca(OH)_2$ , що призводить до розчинення аліту  $C_3S$  та інших мінералів цементного каменю. Напруга 80 В інтенсивно розчиняє ГСАК, а 10 В –  $C_3A$ . Напруга 5 В розчиняє ГСАК, але не виносить продукти розчинення, тому що величини 5 В для винесення недостатньо. Максимальний розчинювальний вплив пульсуючої змінної напруги визначається величиною напруги, а також рівністю швидкості розчинення й швидкості виносу продуктів розчинення, що найбільшою мірою досягається при напрузі 40 В. Причиною найбільшого зниження міцності при напрузі 40 В є розчинення портландиту  $Ca(OH)_2$ .

**Шостий розділ** присвячено впровадженню та експлуатаційній перевірці результатів досліджень. Отримано такі основні практичні результати: розроблено методики проведення експлуатаційних досліджень електрокорозійної небезпеки бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій і споруд від дії змінних напруг і струмів витоку; розроблено схеми та конструктивні рішення захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів та інших споруд від дії змінної напруги і струмів витоку, у т.ч. за допомогою суцільного сталевого екрана із глибинним заземлювачем; сітчастого екрана понизу опор із глибинним заземлювачем; рідкоскляного екрана з глибинним заземлювачем. Рекомендовано виконувати захист конструкцій шляхопроводу (802 км ділянки Гребінка – Черкаси Південної залізниці) від електрокорозії, що виникає під впливом змінної напруги, шляхом заміни на шпалах або плитах мостового полотна скріплень типу КБ або КПП-5 на скріплення УС-1 або PRS-4 з анкерами на сірчаній мастиці, які мають набагато більший електричний опір. Результати досліджень використано при розробці проектів і впровадженні нових технологій захисту від електрокорозії, відновленні й посиленні двох аварійних водопропускних труб (111 та 119 км ділянки Харків – Куп'янск Південної залізниці) і одного шляхопроводу (802 км ділянки Гребінка – Черкаси Південної залізниці), експлуатованих на електрифікованих змінним струмом ділянках Південної залізниці. У співавторстві розроблено 5 нормативних документів з захисту від корозії та посиленню різних конструкцій, будівель і споруд для Головного управління колійного господарства та Головного управління будівельно-монтажних робіт і цивільних споруд Укрзалізниці, у т.ч. «Рекомендації з захисту від електрокорозії конструкцій шляхопроводів, на яких закріплена контактна мережа», а також проект галузевих будівельних норм України. Отримано 3 патенти України на винаходи. Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі в лекційних курсах, на лабораторних і практичних заняттях, у дипломному проектуванні.

Сумарний економічний ефект від впровадження результатів досліджень по дисертації склав 137 тис. грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Велика кількість обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій мостів, тунелів, труб та інших споруд на електрифікованих змінним струмом ділянках залізниць, а також інших обводнених конструкціях, що перебувають під впливом високовольтної змінної напруги від контактних проводів і ліній електропередачі, піддаються інтенсивній електрокорозії. Однією з причин цього є відсутність точного опису механізму впливу зазначених струмів і напруг на електрокорозію обводнених конструкцій.

2. Електрокорозійне руйнування розчину і бетону змінним потенціалом і струмом витоку обумовлено однобічною провідністю в електричному полі гідросилікатного гелю, що має величезну питому поверхню, і їх вилуговуванням шляхом електроміграційного та дифузійного перенесення іонів. Електроміграційне перенесення описано кількісно на основі рівняння стаціонарного потоку в капілярі, побудованому на рівності сили електроміграційного потоку катіонів  $Ca^{2+}$  і сили його тертя об стінки капілярів. На основі цього рівняння визначені швидкості перенесення катіонів  $Ca^{2+}$  (і аніонів  $OH^-$ ) і показано, що ці іони виносяться на поверхню захисного шару бетону. При цьому потоки води по поверхні бетону безповоротно несуть їх із собою, що викликає зниження  $pH$  і, відповідно, вилуговування портландиту.

3. Електрокорозія арматури під дією високовольтної змінної напруги здійснюється шляхом безповоротного винесення за межі захисного шару бетону катіонів заліза  $Fe^{2+}$ . Це винесення супроводжується переходом з арматури вивільнюваних електронів у гідроксильні комплекси типу  $OH^- - H^+ - OH^-$ , які переходять до поверхні арматури по естафетному механізму. Розроблено відповідні схеми естафетного та електроміграційного перенесення, описано їхній кількісний механізм на основі застосування до цементного каменю уявлень про гігантську низькочастотну діелектричну дисперсію дисперсних систем.

4. Переважне перенесення катіонів у гідросилікатному гелі впливає на коефіцієнт дифузії іонів у бетоні. Природу такого впливу розглянуто на основі рівняння Ейнштейна для коефіцієнта дифузії  $D$  колоїдних часток, а також першого закону Фіка для дифузійного перенесення речовини. Знайдено залежності коефіцієнтів дифузії бетону від його марки за водопроникністю  $W$  і  $W/C$ , на основі яких удосконалено класифікацію бетонів за проникністю, прийняту в ГОСТ 31384-2008, ДСТУ Б В.2.6-145-2010. З урахуванням цієї класифікації вперше знайдено та подано в табличній формі і графічно залежність коефіцієнта дифузії бетону  $D$  від його марки за водопроникністю  $W$ .

5. Виявлено і представлено кількісно механізм впливу електричного поля негативно зарядженої поверхні часток гідросилікатного гелю на коефіцієнт дифузії катіонів  $Ca^{2+}$  у граничному шарі води, заснований на тім, що дифузія іона в ньому загальмовується під впливом енергії взаємодії між іоном  $Ca^{2+}$  і потенціалвизначальним іоном  $OH^-$  гелевої частки. Відповідно до виведеного рівняння коефіцієнт дифузії катіона  $Ca^{2+}$  у граничному шарі перебуває в зворотній пропорційній залежності від діелектричної проникності води в цьому шарі та у зворотній квадратичній залежності від  $W/C$ .

6. Виконано експериментальні дослідження зміни струмів, що проходять через бетон під тривалим впливом циклічної змінної напруги 220, 80, 40, 10 і 5

В у проточній воді. Установлено практично лінійну залежність між величинами електроповерхневих потенціалів трикальцієвого алюмінату, портландиту та еtringіту та використовуваною в дослідженнях напругою. Тривалий вплив пульсуючої змінної напруги величиною 40 В у сполученні з потоком води викликає втрату маси  $C_3A$  і  $C_3S$  і значно зменшує міцність бетонних зразків – на 63 і 105 % порівняно з проточною та стоячою водою, відповідно. Виконані фізико-хімічні дослідження, зокрема рентгенофазовий аналіз, показали також, що циклічна змінна напруга 40 В інтенсивно розчиняє портландит  $Ca(OH)_2$  і аліт  $C_3S$ . Напруга 80 В – інтенсивно розчиняє ГСАК, а 10 В –  $C_3A$ . Напруга 5 В розчиняє ГСАК, але не виносить продукти розчинення, тому що величина 5 В є недостатньою для цього.

7. За результатами виконаних експериментально-теоретичних і експлуатаційних досліджень розроблено схеми та конструктивні рішення захисту конструкцій від електрокорозії, яка викликана змінними високовольтною напругою та струмами витоку, у т.ч. за допомогою суцільного сталевого екрана, сітчастого екрана, рідкоскляного екрана, а також шляхом заміни на шпалах або плитах мостового полотна скріплень типу КБ або КПП-5 на пружні скріплення УС-1 або PRS-4 з анкерами на сірчаній мастиці. Результати досліджень використано при відновленні та посиленні двох аварійних водопропускних труб і одного шляхопроводу, експлуатованих на електрифікованих змінним струмом ділянках Південної залізниці. У співавторстві розроблено 5 галузевих нормативних документів. Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі. Отримано 3 патенти України. Економічний ефект від впровадження результатів досліджень по дисертації склав 137 тис. грн.

#### **Основні результати дисертації викладено в роботах шрифтом:**

1. Дудин А.А. Экспериментальные исследования воздействия переменного электрического поля различного напряжения на электрокоррозию бетона // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2012.– Вип. 67. – С. 192–197.

2. Дудін О.А. Дослідження руйнівних факторів на будівлі та споруди станційних комплексів залізниць / О.А. Дудін, Є.О. Мовчан, О.О. Султанова // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 103. – С. 228–235.

*Особистий внесок:* аналіз стану конструкцій та споруд, які піддаються дії руйнівних факторів, визначення ступеня їх пошкодження.

3. Пługин Ал.А. Защита металлических и железобетонных сооружений железнодорожного транспорта от электрокоррозии с помощью диодного заземления / Ал.А. Пługин, О.С. Борзяк, А.А. Дудин, А.А. Конев, А.А. Пługин // Зб.наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 127. – С. 204–212.

*Особистий внесок:* виконання лабораторних та натурних досліджень (сумісно з О.А. Пługіним).

4. Пługин А.Н. Механизмы формирования структуры, прочности и долговечности стали и железобетона на основе электроповерхностного потенциала простых веществ / А.Н. Пługин, А.А. Пługин, Д.А. Пługин, Трикоз Л.В., Пługин Ал.А., Дудин А.А.// Науковий вісник ЛНАУ.- Луганськ: ЛНАУ, 2010.- Вип. 14.- С.250-270.

*Особистий внесок:* аналіз існуючих уявлень про формування структури та міцності сталі.

5. Плугин А.Н. Исследование влияния переменного электрического поля в бетоне на его электрокоррозию / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, А.А. Дудин, Ал.А. Плугин, О.С. Борзяк, А.А. Конев // Вісник ОДАБА.- Одеса, 2010.- Вип. 43.- С. 517-524.

*Особистий внесок:* розробка лабораторної установки і методики вимірювань; виконання електрометричних вимірювань (спільно з О.А. Плуґіним) та фізико-механічних випробувань (спільно з О.А. Плуґіним і О.А.Конєвим), аналіз їх результатів.

6. Плугин А.Н. Исследование влияния токов утечки и блуждающих токов на здания и сооружения, расположенные возле электрифицированных железнодорожных путей / А.Н. Плугин, Ал.А. Плугин, А.А. Дудин, О.С. Борзяк, А.А. Плугин, Д.А. Плугин // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. тр. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. - Вып. 40 (Тематический выпуск «Химия, технология и экология»).- С. 88-104.

*Особистий внесок:* проведення експериментальних досліджень потенціалів на рейках, конструкціях та спорудах (спільно з О.А. Плуґіним), аналіз їх результатів для змінного струму.

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

*Особистий внесок:* проведення експериментальних досліджень електричних потенціалів на рейках, поверхні ґрунту, а також будівлях та спорудах (спільно з О.С. Борзяк та О.А. Плуґіним), аналіз їх результатів для змінного струму.

8. Плугин А.Н. Электрическое сопротивление железобетонных шпал с различными типами рельсовых скреплений / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Ал.А. Плугин, А.А. Дудин // Зб.наук.праць. - Харків: УкрДАЗТ, 2009.- Вип. 111. - С. 245-261.

*Особистий внесок:* проведення експериментальних досліджень електричного опору залізобетонних шпал (спільно з О.А. Плуґіним), аналіз даних про вплив різних факторів на опір.

9. Плугин А.А. Теоретические предпосылки защиты бетонных, железобетонных и каменных конструкций от переменных токов утечки / А.А. Плугин, А.А. Дудин, Ал.А. Плугин, А.Н. Плугин // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2008. - Вип.47. – С. 179-184.

*Особистий внесок:* виконання лабораторних досліджень, аналіз отриманих результатів.

10. Плуґін А.А. Дослідження можливості виробництва залізобетонних шпал за безпропарювальною технологією / А.А. Плуґін, А.М. Плуґін, О.В. Романенко, В.О. Яковлев, О.С. Борзяк, О.А. Плуґін, О.А. Дудін // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 91. – С.211–224.

*Особистий внесок:* виконання лабораторних та натурних досліджень (спільно з О.В.Романенко).

11. Плугин А.Н. Механизм разрушения кирпичной кладки водопропускной трубы переменным блуждающим током или током утечки / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.С. Герасименко, А.А. Дудин, Ал.А. Плугин // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2007. - Вип. 42.- С.112-119.

*Особистий внесок:* виконання лабораторних та натурних досліджень, аналіз отриманих результатів.

11. Патент 87795 UA Рідкоскляна композиція. МПК С04В28/26 Е01С21/00 / А.А. Плугін, А.М. Плугін, О.С. Герасименко, Л.В. Трикоз, С.В. Мірошніченко, О.А. Калінін, Д.А. Плугін, О.А. Дудін, В.А. Лютий, О.А. Плугін.- Заявл. 07.10.2008. - Заявка № а200811931.- Опубл. 10.08.2009.- Бюл. № 15.

*Особистий внесок:* виконання лабораторних та натурних досліджень (спільно з О.С. Герасименко).

12. Патент 88998 UA Спосіб визначення електрокорозійної стійкості захисних покриттів. МПК Е04В1/66 Е04В 1/62 / А.А. Плугін, А.М. Плугін, І.В. Потележнікова, О.В. Афанасьєв, Ю.М. Горбачова, С.В. Мірошніченко, Д.А. Плугін, О.А. Плугін, О.А. Дудін, О.С. Борзяк.- Заявл. 07.10.2008. - Заявка № а200811897. - Опубл. 10.12.2009.- Бюл. № 23.

*Особистий внесок:* виконання лабораторних досліджень (спільно з І.В. Подтележніковою)

13. Патент UA 94875. Спосіб вимірювання вологості і визначення вологісного стану ґрунтів, у тому числі на глибині / А.А. Плугін, А.Н. Плугін, О.С. Герасименко, Л.В. Трикоз, Д.А. Плугін, О.А. Дудін, О.А. Плугін, В.А. Лютий. – Опубл. Бюл. № 11, 10.06.2011.

*Особистий внесок:* розробка устаткування (спільно з О.С. Герасименко).

## АНОТАЦІЯ

Дудін Олексій Аркадійович. Механізм впливу змінного струму витоку й високовольтної напруги на обводнені бетонні, залізобетонні та кам'яні споруди. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 - будівельні матеріали та виробы. Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2012.

Дисертація присвячена експериментально-теоретичним дослідженням впливу змінного струму витоку й високовольтної напруги на електрокорозію бетону й розчину бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій поблизу електрифікованих змінним струмом ділянок залізниць, високовольтних ліній електропередач.

Встановлено, що зношування будівель і споруд на ділянках залізниць, електрифікованих змінним струмом, більше ніж на не електрифікованих. Виконано дослідження в експлуатаційних умовах. Виміряно потенціали на рейках, конструкціях будівель і споруд при проходженні поїзда з електричною тягою, а також при їхній відсутності.

За допомогою оригінальної методики та установки, що автоматично підтримує режим вмикання й вимикання джерела змінної напруги, близький до режиму руху поїздів, виконано тривалі експериментальні дослідження впливу змінного струму при різній нарузі на бетон. Показано, що навіть невисокі напруги, зокрема 5 В, викликають значну електрокорозію бетону.

Виконано фізико-механічні й фізико-хімічні дослідження бетонів, підданих впливу змінного струму (рентгенофазовий аналіз, світлова мікроскопія), які підтвердили коректність теоретичних уявлень про механізм електрокорозії бетону.

Розроблено комплексні способи захисту від електрокорозії бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій, у т. ч. за допомогою металоін'єкційної сорочки; залізобетонної сорочки з бетону оптимального складу.

**Ключові слова:** електрифікована залізниця, змінний струм, бетон, цементний камінь, обводнення, електрокорозія, вилуговування, захист.

## АННОТАЦІЯ

Дудин Алексей Аркадьевич. Механизм воздействия переменного тока утечки и высоковольтного напряжения на обводнённые бетонные, железобетонные и каменные сооружения. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 - строительные материалы и изделия. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2012.

Диссертация посвящена экспериментально-теоретическим исследованиям влияния переменного тока утечки и высоковольтного напряжения на электрокоррозию бетона и раствора бетонных, железобетонных и каменных конструкций вблизи электрифицированных переменным током участков железных дорог, высоковольтных линий электропередач.

Установлено, что износ зданий и сооружений на участках железных дорог, электрифицированных переменным током, больше чем на не электрифицированных. Выполнены исследования в эксплуатационных условиях. Измерены потенциалы на рельсах, конструкциях зданий и сооружений при прохождении поездов с электрической тягой, а также при их отсутствии. Установлено, что они возникают синхронно с прохождением поездов с электрической тягой, величина напряжения и, следовательно, степень повреждения конструкций зданий и сооружений зависят от их расстояния до ближайшего электрифицированного пути и высоковольтных ЛЭП, состояния подрельсового основания, состояния покрытия и грунта между ними, наличия подвалов и заземлений.

С помощью оригинальной методики и установки, автоматически поддерживающей режим включения и выключения источника переменного напряжения, близкий к режиму движения поездов, выполнены длительные экспериментальные исследования влияния переменного тока при различном напряжении на бетоны. Показано, что даже невысокие напряжения, в частности 5 В, вызывают значительную электрокоррозию бетона.

Электрокоррозионное разрушение раствора и бетона переменным током утечки обусловлено односторонней проводимостью в электрическом поле гидросиликатного геля, имеющего огромную удельную поверхность. Процесс выщелачивания бетона осуществляется путем электромиграционного и диффузионного переноса ионов. Выявлен и представлен количественно механизм влияния электрического поля отрицательно заряженной поверхности частиц гидросиликатного геля на коэффициент диффузии катионов  $Ca^{2+}$  в граничном слое воды. Преобладающий перенос катионов в гидросиликатном

геле оказывает сильное влияние на коэффициент диффузии ионов в бетоне. Природа такого влияния рассмотрена на основе уравнения Эйнштейна для коэффициента диффузии  $D$  коллоидных частиц, а также первого закона Фика для диффузионного переноса вещества. Процесс электрокоррозии арматуры осуществляется путем безвозвратного выноса из неё за пределы защитного слоя бетона катионов железа  $Fe^{2+}$ , который сопровождается выносом из арматуры освобождающихся электронов.

Выполнены физико-механические и физико-химические исследования бетонов, подвергнутых воздействию переменного тока (рентгенофазовый анализ, световая микроскопия), которые подтвердили корректность теоретических представлений о механизме электрокоррозии бетона.

Разработаны комплексные способы защиты от электрокоррозии бетонных, железобетонных и каменных конструкций, в т.ч. с помощью металлоинъекционной рубашки; железобетонной рубашки из бетона оптимального состава.

**Ключевые слова:** электрифицированная железная дорога, переменный ток, бетон, цементный камень, обводнение, электрокоррозия, выщелачивание, защита.

### ABSTRACT

Dudin Aleksey A. The mechanism of influence of alternating leakage current and high-voltage on the flooded concrete, reinforced-concrete and stone constructions. Manuscript.

The thesis for the candidate of technical sciences degree by specialty 05.23.05 - building materials and products. The Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkov, 2012.

The thesis is devoted to experimentally theoretical research of influence of alternating leakage current and high-voltage on an electro-corrosion of concrete and mortar of the concrete, reinforced-concrete and stone constructions nearby the electrified by an alternating current railway sections and high-voltage line.

It is established that the wear of buildings and constructions on railway sections, electrified by an alternating current, is higher than that on the non-electrified. The research is completed under working conditions.

With the help of an original method and equipment, which automatically maintains the mode of switching on and off of the source of the alternating voltage close to the mode of passing trains, the long-term experimental researches of influence of the alternating current on concrete by different voltage were done. It is shown that even low voltage, particularly 5 V, causes electro-corrosion of concrete. These damages are caused by one-side conductivity in electric field of hydrosilicate helium, which has a huge specific surface. The process of leaching of concrete is carried out through electromigration and diffusive transmission of ions.

Physic-mechanical and physic-chemical researches of concrete, exposed by alternating current, confirmed the correctness of the theoretical notions of a mechanism of electro-corrosion of concrete.

Complex methods of protection of concrete, reinforced-concrete and stone constructions from an electro-corrosion are developed and applied.



**Keywords:** electrified railway, alternating current, concrete, cement stone, flooding, electric field, electrocorrosion, leaching, protection.

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

**МЕХАНІЗМ ВПЛИВУ ЗМІННОГО СТРУМУ ВИТОКУ ТА  
ВИСОКОВОЛЬТНОЇ НАПРУГИ НА ОБВОДНЕНІ БЕТОННІ,  
ЗАЛІЗОБЕТОННІ ТА КАМ'ЯНІ СПОРУДИ**

Дудін Олексій Аркадійович

Відповідальний за випуск  
Партала Н.М.

---

Підписано до друку \_\_.\_\_.\_\_  
Формат паперу 60×84 1/16. Папір для множних апаратів.  
Друк офсетний. Усл.-печ.л.0,9.  
Задо.№ \_\_. Тираж 100 екз. Безкоштовно

---

**Видавництво УкрДАЗТ. Свідоцтво** ДК № 2874 від 12.06.2007  
Друкарня УкрДАЗТ: пл. Фейербаха 7, м. Харків 61050